

复旦大学国际问题研究丛书

系统学基础

修订版

朴昌根 著

上海辞书出版社

Introduction to Systemology



复旦大学国际问题研究丛书
系统学基础
(修订版)

Introduction to Systemology

西半球的裂变

The Fission of the Western Hemisphere:
The Comparative Study of Development Model between
Modern Latin America and United States

ISBN 7-5326-1894-3



9 787532 618941 >

定价: 40.00元

复旦大学国际问题研究丛书

系统学基础

修订版

朴昌根 著

上海辞书出版社

样-书

上海辞书出版社

Introduction to Systemology

图书在版编目(CIP)数据

系统学基础/朴昌根著. —修订版. —上海:上海辞书出版社, 2005. 12

(复旦大学国际问题研究丛书/龙永图主编)

ISBN 7-5326-1894-3

I. 系... II. 朴... III. 系统科学 IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 107147 号

监 制 张晓敏
常务编辑 陈 乐
封面设计 姜 明

复旦大学国际问题研究丛书

系统学基础(修订版)

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海辞书出版社

(上海陕西北路 457 号 邮政编码 200040)

www.ewen.cc www.cihai.com.cn

常熟文化印刷有限公司印刷

开本 890 × 1240 1/32 印张 20.75 插页 8 字数 520 000

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-5326-1894-3/B·64

定价: 40.00 元

如发生印刷、装订质量问题,读者可向工厂调换。

联系电话:0512-52219025

庆祝复旦大学建校一百周年

复旦大学国际问题研究丛书编委会

Editing Board

编委会主任委员

Chief Member:

龙永图

Long Yongtu

编委会委员(以姓氏拼音为序):

Member: (in order of Chinese pinyin of the members' last name)

陈寅章

Chen Yinzhang

丁 纯

Ding Chun

樊勇明

Fan Yongming

倪世雄

Ni Shixiong

沈丁立

Shen Dingli

沈兰芳

Shen Lanfang

石源华

Shi Yuanhua

赵华胜

Zhao Huasheng

序

□早在1979年,邓小平同志就指出:“政治学、法学、社会学,以及世界政治的研究,我们过去多年忽视了,现在也需要赶快补课。”他还特别指出,要加强“世界政治研究”。

□自改革开放以来,我国对世界政治、国际问题的研究有了很大的进展,在政府部门以及各大院校先后增设了一批研究机构,增加了一批新专业,开设了一批新课程,研究项目也有了较大的成就,我国的国际问题研究学者们勤奋耕耘,取得了丰硕的成果,基本上完成了邓小平同志提出的“补课”的任务。

□但是,与国际同行中的先进水平相比,我国的国际问题研究仍有很多不足。特别是自上世纪末以来,国际形势和世界格局继续发生着深刻的变化,世界多极化和经济全球化在曲折中发展,世界格局和秩序的大转折、大变动的时期正在到来,国际关系正在动荡中进行深度调整。与此同时,我国经济和社会的快速发展,已使中国与世界的关系,成为当代国际问题研究的一个十分重要的内容。我们必须抓住机遇,研究中国和平发展进程中所面临的各种国际问题。

□在这种形势下,国内各大高等院校和科研机构对国际问题研究的重要性和迫切性都有比较深刻的认识,并正在采取各种行动,以进一步增强对国际问题的研究和探讨。复旦大学国际问题研究院编辑出版的《国际问题研究丛书》,就是这种努力的一个组成部分。

□复旦大学国际问题研究院由美国研究中心、日本研究中心、俄罗斯中亚研究中心、欧洲问题研究中心、朝鲜韩国研究中心、北欧研究中心和拉丁美洲研究室等组成。研究院成立的时间虽

然不长,但它集中了复旦大学对于国际问题研究的重要力量,拥有一定的科研能力。特别是美国研究中心作为国家人文社会科学创新基地,在围绕美国和中美关系的问题上,常年进行着重要的研究工作。

□参加这套丛书撰写工作的,既有德高望重、学养深厚的老教授,也有朝气蓬勃、思想活跃的青年学者。我们计划这套丛书每年出版几部研究著述,内容主要侧重大国关系、中国外交、周边问题以及世界政治与经济等方面。我们希望,这套丛书的出版将会进一步推动我国的国际问题研究。



Preface

By Long Yongtu

□Deng Xiaoping pointed out, as early as in 1979, that “[w]e neglected over years the studies on political science, law, sociology, and world politics. Now we need to make up lessons and catch up.” He especially noted that more work should be carried out on the “study of international politics”.

□Since adopting the Reform and Open Door policy, China has made significant progress in research on world politics and international issues. Many new research institutes have been launched in governmental sectors and universities as well as colleges, many new disciplines

are added and curriculums developed, and sizable headway has been made in researches. Due to the dedicated work by our scholars of international relations, great achievement has been accomplished, nearly attaining the objective of catching-up with the world assigned by Deng Xiaoping.

☐ However, there still exist many deficiencies in our research on international issues, compared with our international counterparts. Particularly, since the end of the 20th century, the world has undergone significant changes. Through the turns and twists, the multi-polarization of the world and globalization of economy are in formation. The time has come that the world structure and order are going through great shifting and change, and subsequently, the international relations are being adjusted fundamentally given the turbulence. At the same time, China is rapidly developing its economy and society. Therefore, China's relation with the world has become a rather important issue of contemporary international study. At this time of transition, we shall seize the opportunities and concentrate on various issues that China might encounter in the process of its peaceful development.

☐ Fully aware of its importance and urgency, China's institutions of higher education and research organizations have been exploring various means to deepen the discussion and research on international issues. Part of such efforts is the Series of International Studies published by the Institute of International Studies of Fudan University.

☐ The Institute of International Studies at Fudan University consists of Center for American Studies, Center for Japanese Studies, Center for Russian and Central Asian Studies, Center of European Studies, Center

for Korean Studies, Nordic Center, and Department of Latin American Studies. Young as it is, the Institute has centralized the essence of intellectual expertise of international studies at Fudan, maintaining certain cutting-edge research capabilities. Above all, the Center for American Studies, as the leading state-level Base for Humanities and Social Sciences Innovation, has been undertaking the perennial important research on America and Sino-U.S. relations.

□ The authors of this series of books include both well-established and respectable senior scholars and emerging young researchers. It is expected that several books will be published each year, mainly focusing on studies of major powers, China's foreign policy, China's peripheral environment, and world political and economical issues etc. It is our hope that this series will help advance international study in this country.



A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes.

□复旦大学国际问题研究院韩国研究中心教授。著有《系统学基础》、《韩国产业政策》、《全球化与韩国的应对》等著作,国内外发表约100篇论文。

□在系统学研究中提出一系列的新概念、新观点、新原理,构造自己的系统学体系,阐述系统学的基本概念、基本原理和基本规律,并用来解释自然、社会、认知系统中的诸多问题。

□运用系统学理论与方法研究韩国经济发展历程,全面、系统、深入地阐述韩国产业政策的历史、结构与功能以及主要经验与教训。

□深入研究韩国传统文化(尤其是韩国人的传统社会价值观)与韩国社会现代化的互动关系、朝鲜半岛南北关系、中韩关系、东北亚秩序、韩国科学技术史等,在一系列问题上阐述了自己独到的见解。

修订版前言

本书是我的《系统学基础》(成都:四川教育出版社,1994年)一书的修订版。值此,我想向读者谈谈一些有关事项。

一、简短的回顾

1998年,我在上海参加全国第五届系统科学研讨会。这是我从国内系统科学界“消失”了多年之后第一次参加的系统科学领域的学术会议。会上见到了许多熟人,我感到很高兴。有趣的是与一位多年未见面的熟人的交谈。

.....

问:好久没见,你在国内呀。我以为你在韩国呢。

答:我有时候去韩国,但主要在国内。

问:那么,这几年你为什么不参加系统科学方面的学术会议?我以为你已经入了韩国籍呢。我在讲课时,还给学生讲过,本来上海有个对系统科学很有研究的人,可惜他现在出去了,多年没回来。

.....

这样,我觉得有必要借此机会向所有关心我的系统科学界朋友们介绍自己这些年的情况。

1992年4月,在《系统学基础》(第一版)即将完成之际,我向当时的复旦大学校长写信建议复旦大学成立韩国研究中心。之后,我

开始筹建此研究中心。尤其在当年8月完成《系统学基础》(第一版)后,我的主要精力放在复旦大学韩国研究中心的筹建和韩国学研究的准备上。在当时复旦大学外办主任卢义民先生、副主任孟祥生先生和哲学系主任李继宗先生的支持下,韩国研究中心的筹备工作进行得还算顺利。当年10月,复旦大学韩国研究中心成立,1993年5月我正式被“引进”到复旦大学。在过去的十多年期间,我在韩国研究方面的工作集中在三本书上。

其一是《韩国产业政策》(上海:上海人民出版社,1998年)。

其二是《全球化与韩国的应对》(汉城:白山资料院,2003年)。这是我的个人文集,收入了20世纪90年代以后撰写的论文和有关文章。此书在韩国出版,但其中除英文3篇、韩文14篇外,其余的27篇是用中文写成的。

其三是《韩中关系史》一书的翻译。此书尚未出版^①。

系统科学领域的朋友们感兴趣的可能是这些年我在系统科学领域做了些什么。说实话,因我把主要精力放在韩国学研究,在系统科学领域没有做多少实质性的研究。但是“上贼船易,下贼船难”。我还是没有放下系统科学。我经常想,自己搞了那么多年的系统科学究竟对韩国学研究有没有使用价值。我只要有空,还是关心着国内外系统科学发展动态,而且考虑着自己的系统学体系还有哪些要修改。尤其在访问韩国期间,为了了解韩国系统科学研究情况,也做了一些努力。我多次应邀在韩国有关研讨会上发表演讲,还写了系统学方面的一些东西。这里举下列几项。

1)《系统学》,韩国泛洋社出版部,新学科丛书第51辑,1997年出版。该丛书是在韩国有一定影响的丛书,其中绝大多数是世界名著的韩译本。我的《系统学》好像是在该丛书中当时惟一的、作者直

① 金翰奎. 韩中关系史(上册). 朴昌根译. 汉城:阿尔凯出版社,2005

接用韩文写成的著作。此书在韩国赢得了不少读者。一些教授们把它用于教学和研究；一些学生把它用于撰写学位论文。每当我访问韩国时，都有单位邀请我作学术演讲，甚至还有人专程来上海与我面谈。虽然这是一本普及性读物，但是在此书中我对《系统学基础》（第一版）中的一些观点作了修改。有趣的是有的韩国人在读了我这本书之后，竟然认为中国改革开放之所以进行得有条不紊，原因之一在于中国重视了系统科学^①。

2) “系统科学及其在中国的研究概况”，韩国高丽大学行政问题研究所 Research Paper No. 95—1。这是 1994 年 12 月我应安文锡教授（时任韩国高丽大学行政问题研究所所长）之邀，在专题研讨会上所做演讲的稿件。

3) “从系统学看环境问题”，《科学思想》，1995（冬季号）；另见朴昌根：《全球化与韩国的应对》，韩国白山资料院，2003 年。

4) “Can mankind extricate itself from the dilemma between the economic growth and the environmental pollutions? ”。这是我应黄义珏教授（时任高丽大学经济研究所所长）之邀，在 The Sixth Annual Convention. Congress of Political Economists International (Seoul, January 5—10, 1995) 上发表的论文；另见朴昌根：《全球化与韩国的应对》。

5) “什么是系统学”，在韩国召开的“1999 年世界科技大会”上发表，会议论文集第 1247—1254 页；还刊于韩国《科学思想》（2002 年冬季号）；另见朴昌根：《全球化与韩国的应对》。这篇短文被译成中文刊于于华夫主编《科学中国人优秀论文选（1）》（北京：中国社会科学出版社，2000 年）。此文在国内广为传播，许多论文集收录了此文；

^① 洪旭熙（音）。您知道能扶正国家的系统研究吗？。新东亚（韩国），2000（1）：420—433。
《新东亚》是在韩国颇有影响的综合性刊物。

后来又刊登在张学文先生主办的潜科学网站上。

相比之下,由于种种原因,这几年我很少参加国内系统科学领域的学术活动。上海交通大学陈忠教授曾多次希望我一起参加有关系统科学的学术会议,上海理工大学车宏安教授在编辑《系统科学》和《系统科学与工程研究》时也曾希望我写点东西,但是我都谢绝了,深感抱歉。记得这些年我只参加了在上海召开的两次系统科学会议。我在这两次会议上发表的论文如下。

1) “对系统学研究中若干基本问题的反思”,在全国第五届系统科学研讨会(上海,1998年10月)上发表;后来刊于《系统辩证学报》1999年第4期;另见朴昌根:《全球化与韩国的应对》。

2) “从系统自组织与他组织概念看韩国经济发展过程中市场与政府的关系”,在中国系统工程学会系统动力学专业委员会“面向新千年的复杂系统研讨会”(上海,1999年12月)上发表;后来刊于《亚太经济》2000年第3期;另见朴昌根:《全球化与韩国的应对》。

此外,在韩国学研究中,有时候我尝试着使用系统学理论与方法。但是,由于这个领域的学者们对系统学毫无了解或几乎没有了解,在有关论著中我只好尽量不用系统学用语。不过,在这些年的韩国学研究中,我还是体验到:正如所有系统科学领域的同行们所希望、所相信的那样,系统学理论和方法在相当广泛的范围内是非常有效的。

因此,在这次《系统学基础》修订版中,我本想在阐发系统学原理时适当利用韩国学研究中的研究成果,但是考虑到篇幅,未能如愿。只是在参考文献中,我提供了自己撰写的一些韩国学研究论著题目。

二、中国的系统研究成果

在系统研究中,我曾经向国内读者介绍过国外系统研究成果。

对于我国系统研究状况,我在上面提到的“对系统学研究中若干基本问题的反思”和“系统科学及其在中国的研究概况”中作过粗略整理。本来,我一直想着对我国系统研究状况进行一次综合性考察是一件有意义的事情。现在,我们看到这方面已经有了许国志先生主编、顾基发先生与车宏安先生副主编的两部著作。

众所周知,从 20 世纪 70 年代末开始的中国系统科学发展中,起到最大作用的是钱学森先生。作为工程控制论的创始人,钱学森先生在系统科学领域能洞察其前沿,捕捉其核心,揭示其前进方向。他渊博的知识、活跃的思想、非常的智慧一直激励着广大系统研究者前进。中国几乎所有的系统研究者都从钱学森先生的著作、论文和演讲中得到了启发。我认为,过去的 20 多年来,钱学森先生在中国系统科学发展中最重要的直接贡献,是他提出了已为中国广大系统研究者广泛认同的系统科学体系。

在这几年中国的系统科学研究中,最重要的文献是:

1) 许国志^①主编,顾基发^②、车宏安^③副主编:《系统科学》(上海:上海科技教育出版社,2000 年)

2) 许国志主编,顾基发、车宏安副主编:《系统科学与工程研究》(上海:上海科技教育出版社,2000 年)

可以说这两本书较全面地反映了中国系统科学研究的历史和现状。《系统科学》一书在充分肯定钱学森先生在中国系统科学发展中的贡献的基础上,还对整个中国系统研究方面的成果作了一次汇总。

① 许国志:中国工程院院士,中国科学院系统科学研究所研究员,曾任中国系统工程学会理事长。

② 顾基发:时任中国系统工程学会理事长,中国科学院系统科学研究院研究员,现任国际系统研究联合会主席。

③ 车宏安:上海理工大学系统工程研究所教授,时任中国系统工程学会教育与普及工作委员会主任。

此书在注释与参考文献第 27 条中写道^①：

我国社会科学界自 80 年代以来,对系统科学开展了广泛的研究活动,取得了多方面的成果,如:刘长林.中国系统思维.北京:中国社会科学出版社,1990;魏宏森,曾国屏.系统论——系统科学哲学.北京:清华大学出版社,1995;湛垦华.系统科学的哲学问题.西安:陕西人民出版社,1995;邹珊刚等.系统科学.上海:上海人民出版社,1987。

多年来,各方面的学者对系统科学的基础理论进行了有意义的探索,如:朴昌根.系统学基础.成都:四川教育出版社,1994;颜泽贤等.复杂系统演化论.北京:人民出版社,1993;陈禹.关于系统的对话.北京:中国人民大学出版社,1989;周硕愚.系统科学导引.北京:地震出版社,1988;杨士尧.系统科学导论.北京:农业出版社,1986;周曼殊.改革、开放与复杂系统.长沙:国防科技大学出版社,1990;苗东升.系统科学精要.北京:中国人民大学出版社,1998;谭跃进等.系统学原理.长沙:国防科技大学出版社,1996;姜璐.熵:系统科学的基本概念.沈阳:沈阳出版社,1997。

20 多年来,在大量实践的基础上,出版了一批运筹学和系统工程的专著和教材,被广泛采用的,如:李德,钱颂迪等.运筹学.北京:清华大学出版社,1982;陈挺.决策分析.北京:科学出版社,1987;王众托.系统工程引论.北京:电子工业出版社,1985;汪应洛.系统工程.北京:机械工业出版社,1986;孙东川等.系统工程简明教程.长沙:湖南科学技术出版社,1987;夏绍玮,杨家本,杨振斌.系统工程概论.北京:清华大学出版社;刘豹,寇纪淞.能源系统工程.北京:机

① 许国志主编.系统科学.上海:上海科技教育出版社,2000.390

械工业出版社,1991。

在此,我觉得有必要补充下列几项研究成果。

魏宏森先生的《系统科学方法论导论》(北京:人民出版社,1981年)和黄麟雏、李继宗、邹珊刚先生的《系统思想和方法》(西安:陕西人民出版社,1984年),在非常缺少有关系统科学的中文读物的那个年代,为推动系统科学、系统思想在中国的普及与发展,起到了重要的作用。在当时的历史条件下,这些书为哲学界吹入了新鲜的空气。我认为,自中国社会走向改革开放以后,中国哲学的真正的变革始于“自然辩证法”领域,而“系统论”曾经是中国学术界思想解放的一面旗帜。

金观涛先生的《整体的哲学》(成都:四川教育出版社,1987年)作为他主编的《走向未来》丛书之一,是国内较早论述系统进化问题的著作之一,它在哲学和社会科学界产生了不小的影响。相比之下,此书在系统科学界并未产生广泛共鸣。

乌杰先生的《系统辩证论》(呼和浩特:内蒙古人民出版社,第一版,1988年;后由人民出版社再版)可以说是国内关于系统科学哲学问题的最早的专著之一。他担任过高级官员,现又担任中国系统科学研究会会长等多种职务,这本书发行量也很大。国内对“系统辩证论”的评价多种多样,从一个极端到另一个极端。我认为,一个哲学理论的存亡取决于它的哲学价值,而一个哲学理论的哲学价值首先取决于它的范畴体系及其逻辑展开。一时的流行,眼前的认同,实用的认可,外界的支持,都不能说明一个哲学理论的哲学价值;时间将是最后的审判官。

我认为,在迄今为止的中国人文社会科学领域系统研究中,最活跃的是哲学领域。同时,在中国当前的系统研究中,最薄弱的也是哲学界的系统研究。实际上,中国哲学界目前还不知道系统哲学或系统科学哲学应该定位于何处。或者给“系统论”披上马克思主义哲学

的外衣,或者给马克思主义哲学贴上“系统论”的标签,决不是发展系统论(或系统哲学)或马克思主义哲学的正确方式。

在系统科学领域,由中国人率先提出的一些理论也是值得介绍的,尽管对这些理论至今有这样那样的争议。举例如下:

邓聚龙先生的《灰色控制理论》(武汉:华中工学院出版社,1985年)和《灰色系统(社会·经济)》(北京:国防工业出版社,1985年)开创了灰色系统理论。但是,灰色系统理论的理论基础似乎尚未得到普遍认同。

在数学领域,吴学谋先生的《逼近转化论与数学中的泛系概念》(长沙:湖南科技出版社,1984年)为泛系理论奠定了基础,也是一项开创性的研究成果。但是,泛系理论的数学难度和漫无边际的展开使一般人望而却步,不敢问津。

还有一本值得介绍的著作是张学文先生的《组成论》(合肥:中国科技大学出版社,2003年)。组成论引入广义集合、分布函数、复杂程度、最复杂原理等概念与原理,系统地探讨了系统的内部组成问题。此书出版时间不长,尚未见到更多的评论,但是其中使用的一些概念与原理,同学界普遍使用的相关概念与原理之间的关系问题,似乎有待进一步澄清。

在系统科学理论研究领域,非常引人注目的是顾基发先生在钱学森、许国志等先生的研究基础上倡导的“物理-事理-人理(WSR)系统方法论”^①。这将是一项意义深远的大综合,不仅是物理、事理、人理的大综合,而且是东西方文化和科学的大综合。人们正期待着它的进一步展开。

这里,我想谈一谈东方系统科学问题。

① 顾基发.物理-事理-人理(WSR)系统方法论.见:许国志主编.系统科学与工程研究.上海:上海科技教育出版社,2000.35-48

顾基发先生和朱志昌先生在倡导“物理－事理－人理(WSR)系统方法论”时把它看作是一种“东方系统方法论”。这使我感到有必要将我这几年的一些与此有关的观点介绍给读者。

○系统学是一门年轻的学科。说它活像一个正在学习走路的孩子一样也不过分。系统理论研究开始于西方学者,但是如果考虑到东方传统文化中蕴含着系统论的诸多萌芽,就可以期待东方文化将为系统论和系统学的未来发展做出重大贡献。从某种意义上说,系统研究或许在东方结出它的果实。

——引自《系统学》(前言,1997年)

○文化多样性和科学单一性的矛盾是对人类文明的严重挑战。我们可以在地球上的不同地区、不同国家、不同民族中发现不同类型的文化。惟一的例外是科学。迄今为止,人类的全部科学知识都被归入到源于西方的科学体系之中,而它被看作是唯一正确的科学体系。我们不可否认人类文化中的普遍性,但这种普遍性决不是对文化多样性的否定。那么,科学的单一化是由于它的普遍性,还是由于它还没有发展到多样化的阶段?是文化的多样化应该在科学面前止住它的步伐,还是科学的单一化应该在文化面前止住自己的步伐?是科学的单一化应该向多样化发展,还是文化的多样化应该向单一化发展?历史将给出对这些问题的最终答案。

○现代人对近代的科学只承认一个理论体系,即西方近代科学体系。当现代人说东亚传统时代有许多科技成果的时候,通常不是从“东亚传统科学”本身的科学性上进行评判,而是从西方近代科学的角度上进行评判。结果,凡是

可以纳入西方近代科学体系的,都被看作是科学的;凡是无法纳入西方近代科学体系的,都被看作是非科学的或反科学的。但是,从理论上讲,西方近代科学只是多种可能的科学体系中的一种。自然界是一个,但是对它的理论完全可能是多种,如像对同样一个物体,不同民族用不同语言表示一样。实际上,对于同样一个对象,完全可以建立不同的科学理论体系,如天文学曾有托勒密体系和哥白尼体系,现代医学有西医体系和东医体系,量子力学有矩阵力学体系和波动力学体系。

○西方近代科学在传入东亚后,一开始并未受到应有的重视,但最终以严密的逻辑性和强大的实用性摧跨了东亚传统科学的生存价值。东亚人未能借助西方近代科学发展自己数千年来积累的科学传统,只能在将自己的科学传统几乎完全搁置一边的情况下全盘接受了西方近代科学的基础和整个理论体系。在西方近代科学的强大冲击下,东亚传统科学未能发展成为可与西方近代科学并存的一个独立的理论体系,它成为历史上的文化遗物。惟一的例外是东亚传统医学。西方近代科学不仅未能摧跨东亚传统医学,反而为东亚传统医学的发展提供了新的契机。

○有人说,西方近代科学在全世界的胜利是优胜劣汰的进化过程的结果。的确,在自然界和人类社会文化系统的进化过程中,历史在创造出许许多多的可能性的同时,无情地永恒地淘汰大多数的可能性,只让一种或少数几种可能性享有了继续延续下去的幸运。因此,科学体系的多样化即使在逻辑上是可能的,但这种可能性能否转化为现实性,这不仅是对历史的一个考验,而且是对人类智性的一个考验。但是,只要有一线希望,就决不放弃,这也是由人的

本性决定的。

○因此,在研究东西方科学史时,我们应当摆脱传统的单一研究模式的束缚,不仅要研究东方传统科学成就能否被纳入西方近代科学体系,更要研究能否在东方传统科学研究成果基础上建立有别于西方科学体系的东方科学体系。假如依据东方传统科学的历史资料能推出与西方科学体系不同的东方科学体系,那么东方传统科学的成就应该受到重新评价,从而就可以断定:东方人之所以未能建立自己的现代科学体系,是因为东方科学体系的形成过程因西方近代科学的传入而被中断。因此,从东方传统科学所留下的资料出发,考察能否建立独立的东方科学体系,将是科学史研究的一个重要方向,也是科学研究的一个重要方向。在沿着这个方向所进行的努力中,东亚传统医学在世界科学发展中所要起的作用将相当于“以太漂移”和“黑体辐射”在物理学发展中所起的作用。

——“东亚传统科学的命运——为了超越文化多样性与科学单一性的矛盾”(提要)(上海市科技史学会 2003 年度学术年会, 2003-09-20; 见: <http://www.survivor99.com/pscience/piao/piao0402.htm>)

○西方科学思想的发展经历了否定之否定过程。在古希腊罗马时代科学中占主导地位的是整体论,在 16—17 世纪科学革命以后近代科学中占主导地位的是部分论,而在 20 世纪以来的现代科学中,新生的系统论科学思想方兴未艾,正在以不可抗拒的力量冲击科学技术和人类生活的各个领域。如果说部分论是对整体论的第一次否定,那么系统论就是否定之否定。

○在以中国传统科学为中心的东亚传统科学中,占主导地位的科学思想是整体论,而不是系统论。将东亚传统科学中的整体论看作“系统论”或“系统思想”是牵强附会的。中国传统整体论的主要特征在于主张“主客不分”、“天人合一”、“天人感应”。这种整体论虽然推进了中国人对世界宏观形象的描述,但是却阻碍了中国人科学认识的深入。东亚传统科学之所以未能建立自己的科学理论体系,未能向近代科学发展,主要原因之一就在于此。

○惟一的例外是东亚传统医学(包括中医学、韩医学、藏医学等)中的科学思想。现以中医学为例。中医学在强调人体整体性的前提下,从阴阳学说出发,将人体子系统设定为五脏六腑,将人体分系统设定为作为物质、能量、信息特殊传递通道的经络,进而以穴位表示经络系统的控制机构,通过人体阴阳的相互关系和调节,研究生理、病理、病因等,提出一系列的诊断、治疗与保健方法。这里所体现的是与现代系统思想相一致的中国传统的系统思想。正因为此,中医学建立自己独特的医学理论体系,成为现今两大医学体系之一。

○中国传统科学上的整体论虽然长期阻碍中国传统科学发展,使中国传统科学长期落后于西方,但是它可以在来自西方的系统论的刺激下得到重塑,成为推进中国科学发展的契机。中国的科学发展有可能在两个方向上呈现:其一是推进西方现代科学在中国的高速发展,其二是使中国传统科学获得新生,构建可与西方现代科学体系并驾齐驱的东方现代科学体系。

——引自“东西方‘系统思想’之比较”(提要)(上海市科技史学会 2004 年度学术年会,2004-10-09)

总之,我认为,建立东方特色的科学体系是完全可能的。尤其在系统学、生态学、环境学、(广义)经济学、管理学等综合性较强的学科领域,如果能吸收西方现代科学的成就和中国传统整体论的长处,就完全有可能建立东方特色的科学体系。东方人的祖先在医学上曾经为世界文明留下了可与西方医学体系平分秋色的东方医学体系,那么有什么理由怀疑现代东方人在其他领域也能创建可与西方现代科学体系平分秋色的东方科学体系的可能性呢。

三、关于《系统学基础》修订版

最近几年,我一直想在适当时候出版《系统学基础》一书的修订版。主要有两个原因。其一是不少人问我能否买到此书,其二是原书中有的观点需要修改,有的提法需要更加规范,而且原书中文字方面的错误不少。但是,我在复旦大学国际问题研究院韩国研究中心从事韩国学研究的情况下,很难抽出时间进行修订工作。虽然在西方国际关系学术界,“体系论”被看作是20世纪最重要的国际关系理论之一^①,但是中国国际关系理论界尚未表现出对系统理论的广泛重视。在这种情况下,我只好一再推迟修订工作。直到2003年,复旦大学教务处同意把《系统学基础》列入“复旦大学‘十五’课程建设项目”之内,我才有理由抽出大量时间进行修订工作。

既然《系统学基础》修订版的出版与教学有关,这里就有必要谈两个问题。其一是系统学教育的必要性问题,其二是《系统学基础》修订版的修改内容。

① 系统学教育的必要性

教育的首要目标是培养人才。那么,我们的时代所需要的是什

① 倪世雄等.当代西方国际关系理论.上海:复旦大学出版社,2001.327—335

么样的人才呢?大致上,人才可分为三种类型^①。

其一是“I”型人才,他们具有某一方面的专门知识,但知识面太狭窄。他们是某一方面的专家,能在其专业领域获得重大成功,但一旦离开其专业领域,就变成庸才。在产业结构不断革新、科学技术日新月异、知识更新日益加剧的现代社会里,我们经常看到一些“I”型人才落伍、失业、淘汰。

其二是“一”型人才,他们具有多方面的通用知识,但他们缺少任何一个领域的专门知识。他们的知识多而不精,广而不深,虽然能适应变化多端的现代社会,但他们无法在任何领域获得重大成功。

其三是“T”型人才,他们既有广博知识,亦有专门知识。他们以博促专,一专多能。他们能在自己的专业领域取得重大成功,也能适应变化多端的环境,从某一领域的专家变成另一领域的专家。他们是通才型的专才,又是专才型的通才。

每个人根据自己的实际情况,可选择成为“I”型人才、“一”型人才或“T”型人才,一个社会也可根据自己的需要培养适当比例的“I”型人才、“一”型人才和“T”型人才。但是,纵观人类发展史,那些对科学、技术和社会进步做出重大贡献的人才主要是“T”型人才。因此,对一个社会来说,“T”型人才越多越好;对一个社会成员来说,如能成为“T”型人才,不仅更能充分实现自己的自由个性,而且更能为社会做出贡献。因此,教育应该把培养更多的“T”型人才作为自己的战略任务。

问题在于如何培养“T”型人才。不能否认个人的天资和努力在其成长道路上的重要作用,但是也不能忽略教育的作用。一般系统理论的创始人贝塔朗菲(Ludwig von Bertalanffy, 1901—1972)在谈到一般系统理论的教育意义时曾经指出:

① 朴昌根. 系统学(韩文). 汉城:泛洋社出版部,1997. 7—8

“在教育上对培养‘科学通才’和发展跨学科‘基本原理’的需要正好是一般系统理论所力求给以满足的。……一般系统理论是走向跨学科综合与综合教育的重要一步。”^①

系统学之所以能为培养“T”型人才做出贡献,显然是因为它在自然科学和人文社会科学以及认知科学的广泛领域发现同型性、实现跨学科综合方面已经和正在取得重要的理论成果。因此,在各级学校教育中,进行与之相应的系统学教育乃是培养“T”型人才的一个重要的捷径。美国国家研究理事会所著《美国科学教育标准》强调“系统、秩序、组织”概念与过程在学校教育中的重要性^②,确实是值得借鉴的。

② 《系统学基础》修订版的简短说明

这里,我想在与第一版的比较中指出修订版中所做的修改。

第一,修订版在篇目方面与第一版相比没有多少变化,但有些地方还是做了改动,例如在第一版中不少用过“系统科学”一词的地方现在改用“系统学”。

第二,在内容方面,主要的修改有两点。其一,在阐述我的系统科学体系时,将系统科学的应用领域称为“系统技术”,以此解决了第一版中无法用一个概念包括系统工程、控制技术和信息技术的困难。勾画系统科学体系的图2—7也做了相应的修改。其二,第三章第3节中的“分系统”概念的定义有了变化。在第一版中,我主张“子系统”可看作“实体”,但“分系统”不能看作“实体”,只是在现实中“分系统”可表现为“实体”。但是,在修订版中不做这种区分,并给出更明确的“分系统”定义。我在1997年出版的《系统学》(韩文)一书中已

① Bertalanffy L. v. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968. 51

② 许国志主编. 系统科学. 上海:上海科技教育出版社,2000. 15

经以这种新方式定义了“分系统”。此外,在第七章第4节讨论社会系统分叉时,第一版中曾用较多篇幅讨论过俄国、中国和朝鲜半岛的例子,但是现在只保留了朝鲜半岛的例子。内容上的修改还有几处,目的是将自己的观点表达得更明确,更为规范。

第三,修辞上的修改全书各处都有,用不着一一列举。第一版在文字上的错误之处确实不少,其中有些是由于我的笔误或疏忽,有些是由于出版社方面的原因。相信修订版在这方面的错误会减少许多。

第四,参考文献的编排做了调整。第一版把参考文献分为Ⅰ(我的论著目录)和Ⅱ(各章节参考文献)。修订版不做这种区分,将全部参考文献都按章节编排。此外,考虑到读者知识结构上的差异,我在本书中使用大量图表,以便那些数学基础较弱的读者也能通过这些图表直观地理解有关内容。在修订版中,除了我自己设计的图表(有个别例外)和学界广泛使用的常识性图表外,我都给出了这些图表的出处。但是,在使用他人设计的有些图表时,根据本书需要,我做了改动。

修订版的情况大致如此。这里,为了避免不必要的误解,想对修订版内容方面再做一点补充说明。在本书内容的阐发中,我没有使用“非线性科学”、“复杂性科学”、“混沌学”等时髦字眼。在学术研究中,我不喜欢人云亦云,也不喜欢动不动就宣布发现了什么新规律或创立了什么新学科。记得20世纪80年代,“老三论”(指系统论、控制论、信息论)、“新三论”(指耗散结构理论、协同学、突变论)的提法曾风靡一时,系统科学的发展被描绘成从“老三论”到“新三论”的发展。我从心底里厌恶这种提法,不仅是因为这种提法根本不符合系统科学发展的历史事实,而且是因为这种文字游戏对科学发展毫无裨益。况且,学术界没有必要勾起人们与“老三篇”和“新三篇”有关的不愉快回忆。

我认为,在“非线性科学”、“复杂性科学”等概念的使用上也需要斟酌。我们知道,20世纪80年代以来,国内外掀起了研究“非线性”和“复杂性”的新热潮。在国外,1984年成立的美国 Santa Fe Institute 成为复杂性科学研究的又一个重要基地;在国内,许多非线性(或复杂性)科学研究机构纷纷登场。除了“非线性科学”、“复杂性科学”等新的名称外,还出现了复杂适应系统理论^①、“复杂网络”理论^②等许多新理论。考虑到篇幅和本书的目的,我在本书附录中没有补充对这些理论的介绍。当然,在修订版中,我在阐述自己的观点时还是在力所能及的范围内尽量参考国内外学者的新成果。

非线性和复杂性受到学界广泛重视,是一个非常值得称道的现象。贝塔朗非等人早在20世纪50年代就成立一般系统研究会,掀起系统运动,力求把科学研究的潮流从封闭系引向开放系,从线性系引向非线性系,从平衡系引向非平衡系,从简单性引向复杂性。只要懂得什么是系统“整体性”,就可知道系统赖以形成与存在的一个必要条件是诸要素之间的非线性关系;整体性的“突现”依赖于系统内部的非线性。因此,对于系统研究者来说,“非线性科学”或“复杂性科学”等新名称的出现并不具有特别的学术意义,几十年来他们一直在研究非线性和复杂性。

物理科学家投入系统研究并不是到了20世纪80年代才出现的现象,而是在70年代已经由普里戈金(Ilya Prigogine, 1917—2003)和哈肯(Hermann Haken, 1927—)开始了。当然,进入80年代后更多的物理科学家和数学家更迫切地认识到研究非线性和复杂性的必要性,并投入非线性和复杂性研究,这必将使系统科学取得更大的

① 许国志主编. 系统科学. 上海:上海科技教育出版社, 2000. 250—295

② 徐福缘、王衡山、车宏安(编). 复杂网络——系统结构研究文集(第二辑). 上海:上海理工大学管理学院、系统工程所, 2004

发展,尤其是系统科学的数学化必将取得进一步的发展。但是,我认为有必要再次强调,如贝塔朗非曾经警告过的那样,系统研究不能陷入数学形式主义(见本书 2.5.1)。看来,为了确切地阐明系统学以及整个系统科学的时代性、科学性和实用性,需要有认真的哲学诠释。

我在 1999 年发表的“什么是系统学”一文^①中曾经指出:

系统学在理论上和实践上的成就是众所周知的,但是在系统学研究中尚待解决的问题也不少。……最根本的问题是系统(科)学能否真正确立为一门独立的科学领域。对此人们已争论了数十年。问题的关键在于系统(科)学究竟如何解决其他传统学科未能解决的一些问题。也许只能期望由历史给出对此问题的最终答案。

但是,在遭受最终的失败之前,我们应该继续努力。在探索真理的道路上,没有人能达到最终的目的,每个人只是为过程留下自己的印记。

最后,欢迎读者对我的《系统学基础》修订版提出批评。

朴昌根

2004 年 11 月 30 日

① 朴昌根. 什么是系统学. 见:于华夫主编. 科学中国人优秀论文选(一). 中国社会科学出版社,2000. 265—266; <http://www.survivor99.com/pscience/thesis/piao0310.htm>

第一版前言

在把这部著作献给读者之际,我想向读者坦诚地谈一谈我的系统研究的经历和有关的一些问题。

一

现在,似乎没有一个科学术语比“系统”更为流行。无论科学家还是政府官员,无论自然科学家还是社会科学家,都乐意谈论“系统”。甚至有些音乐家和历史学家也谈及“系统”概念的重要性。“系统”这一平凡的单词成为一个如此广为使用的科学概念,是 20 世纪中期的事情。我们首先应当将此归功于贝塔朗菲,如在正文中所述的那样。

中国人之广泛接触系统理论,是 10 多年之前的事情。控制论和信息论是较早就已传入中国的,但是其他多种系统理论则到了 20 世纪 70 年代末才被介绍到中国学术界。当时,一般系统理论问世已有 40 年,系统科学在欧美已热闹了 20 多年。仅是这一点也足以使我们体会到开放政策的伟大。

在各种系统理论的传入过程中,首先出现的是大量的译文和介绍性文章,之后是为数不少的译著,再后是一些由中国人自己写的介绍性著作。实际上,至今为止国内出版的系统科学著作,仍以分门别类地介绍国外各学派的理论为主,由中国人自己写的自成体系的系

统科学著作仍然极为少见。我相信,今后这种著作会有所增多。

在本书的附录中我也分门别类地介绍了各种系统理论,但是本书的正文是按照我所构造的系统学体系写成的。因此,不管成功与否,本书是第一本综合各种系统理论主要成果而写成的自成体系系统学著作。虽然我清楚地知道自己的局限性,但是我觉得自己作这一尝试并不是太过分的举动,因为我认为自己是国内最早阅读贝塔朗菲的经典著作《一般系统理论》的少数几个人之一,而且我在过去的 10 多年间一直专心致志地从事系统理论研究。

二

我是从 20 世纪 70 年代末被卷入系统研究的。当时我在复旦大学自然辩证法专业读研究生。我们 10 个研究生都面临着往哪个方向发展的问題。平时对普遍性东西的爱好和对世界统一性的追求,是我进入系统研究领域的一个原因。

在这 10 多年内,我在系统科学和系统哲学领域发表的著作和论文可从参考文献 I 中看到它们的题目^①。这些文献是按照时间顺序排列的,所以从中可了解我在各个时期主要研究了什么问题。下面,我将自己所作的研究工作简单地介绍给读者。

其一,是关于系统科学体系和系统学体系的研究。这一方面是出自教学的需要。我从 1985 年起讲授系统科学基础理论,这就需要有个教学顺序和教学内容的逻辑框架。另一方面,是出自创立系统学的需要。我们已经看到了各种系统理论,但是为了实现这些系统理论的统一必须开发出一种理论结构。

其二,是关于结构与功能之间关系的研究。传统理论也谈论结

① 修订版中将参考文献 I 和参考文献 II 合并为“参考文献”。

构和功能及其关系,但是人们所重视的只是两者之间的静态关系。我并不否认这种静态关系的重要性,但更重要的是两者之间的动态关系。这是系统学的一个基本问题。

其三,是关于系统与要素之间关系的研究。片面地强调系统或整体的加和性、非加和性或整体与部分的同一性都是错误的。各种特性都有其特定的合理地位。

其四,是关于系统进化的研究。“系统进化论”一词是由我最早引入的,对此正文中已有交代。在这个领域,我把系统进化趋势明确地分为层内进化和层间进化,并阐述系统进化中的周期性问题。尤其在大量复杂系统的层内进化中出现从平衡有序结构到准平衡结构、耗散结构、混沌结构的依次更替。我力求揭示这种转变的机制,并用这里所出现的规律性来解释许多现象。这一规律的适用范围尚不清楚,它的表述也许有不妥之处,但是它的价值似乎还是明显的。将系统进化的因素概括为开放、非平衡、非线性、涨落、选择与隔离也是我的一种尝试。

其五,是关于系统方法的研究。将系统方法看作是结构方法、功能方法与历史方法的统一是我的一个尝试,而这一观点得到了许多人的支持。

我在其他一些问题上也提出了不少与众不同的观点。我并不认为自己的新观点一定都正确,但是我坚信:如无标新立异,科学就不能发展。

迄今为止,我单独或与人合作共写了三部书,并发表了 40 多篇论文。其中有的论著在学术界产生了一定影响。例如,1985 年我写了“国外系统理论研究”一文。这篇文章在 1986 年刊登在《自然辩证法研究》杂志之后,在国内系统理论界广为传播,似乎产生了不小的影响。后来,我应著名系统科学家、国际系统科学学会前任主席、生命系统理论创始人、国际系统科学学会机关刊物《行为科学》主编米

勒(James Grier Miller, 1916—2002)的邀请,在《行为科学》杂志上发表了“世界主要系统理论”一文。这篇文章占了该季刊 1990 年第二期(共 80 页)的 29 页,并且排为第一篇。这篇文章由两部分组成,前半部是对各种系统理论的评介,与国内发表的上述文章大致相同,后半部是我关于系统科学体系的研究。米勒先生在刊用这篇文章时曾说道:“它将在全世界产生重大影响”(1990 年 5 月 14 日给我的一封信)。我本来以为这只是一种礼节性的话语。但是后来的事实应验了他的这一句话,几乎所有主要国家(如美、英、法、德、苏、西、印度、加拿大等国)都有人来函索取其复印件(由于经费上的原因,我只满足了其中少数人的要求,心里深感歉意)。

我在大部分时间里都在家看书或写作,不大关心外界对我工作的评价。当我得知英国剑桥国际传记中心编辑的《有成就的人》(第 15 版)和《世界知识分子名人录》(第 10 版)想要收录我的简历和成就,并被该中心评为“1991/92 年度世界名人”时,颇感意外。我为自己发表的论著不像被抛入大海的石头那样无人问津而感到欣慰。但是,我并不为这些事情感到兴奋。在科学研究中惟一使我兴奋的事情是某些使我感到苦恼的问题得到使我感到满意的解释,从而使我的某种好奇心得到满足。别人对我的评价与我的这种心理欲望无关。

三

既然说到这里,似乎我应当交代自己为什么致力于科学研究。诚然,我也知道科学有利于人类,可以转化为生产力,而研究科学的人应当用科学来为人类服务。

似乎可以用另一种方式来回答这个问题。我们每个人都追求自由。按照马克思(Karl Marx, 1818—1883)和恩格斯(Friedrich En-

gles, 1820—1895) 的观点, 自由王国是我们人类的共同理想。不幸的是在现实生活中, 自由是自由的敌人, 一部分人的自由以另一部分人的不自由为代价。从行为上讲, 在现存的社会中只能如此。但是, 存在着一些领域, 在那里我们能享受足够多的自由而不影响别人的自由。科学就是这样一个领域。在我看来, 科学不仅是争取自由的强大武器, 而且是享受自由的最理想的职业。当然, 在科学领域所能充分享受的也不是行为自由, 而是思想自由。如无思想自由, 就没有科学上的创新。

但是, 现实的科学界并不是自由王国。人们常说, 辩证法不承认永恒的东西, 科学不承认权威。但是在现实的科学界里到处都有权威, 为数不多的例外是那些新兴学科领域。因此, 在科学研究中, 一个人最能享受思想自由的领域是像系统科学这样的新兴学科领域。如果借用维纳(Norbert Wiener, 1894—1964)的话, 就可以说“这不是一处鼓励任何人或者使任何人有可能摆架子的地方。”^①在系统科学领域, 似乎每个人都可以“为所欲为”, 既可以毫无约束地“胡思乱想”, 也可以无所顾忌地发表“胡言乱语”, 而不用担心自己的观点是否有悖于“科学常识”。实际上这也是我选择系统科学作为自己研究领域的原因之一。回想起来, 这些年我们许多人的确在系统科学研究中享受了思想自由。

但是, 思想自由只是思想自由。搞科学, 光靠思想自由是不够的。我们知道, 发表论文要付论文发表费, 出书要付出版费, 参加学术会议要付交通费、住宿费和会务费, 此外购书费、复印费、计算费、邮寄费等, 都远不是用自己的工资收入付得起的。如无经费支持, 基础研究是难以进行的, 所谓思想自由也会受到严重的限制。人们常说“脑体倒挂”、“造原子弹的不如卖茶叶蛋的”(顺便补充一句, 一位

① 维纳 N. 控制论. 郝季仁译. 北京: 科学出版社, 1985. 1

外国朋友曾开玩笑说,“这一措施有利于世界和平”)。我觉得,对一个献身于科学的人来说,生活的清苦是无所谓的,最难忍受的则是由于没有经费支持而无法进行自己的研究工作;金钱剥夺思想自由。

我认为,就其本身而言,科学不是商品,也不应成为商品,但是在现实中它正在变成商品。有的人虽然不作什么研究工作,但靠着手中的钞票,可以出论文,甚至可以出学术著作。学者写论文写书,有钱人负责发表,但不是无偿的,而是联名。这是“科学精神”和“商业精神”的巧妙结合,似乎双方都心甘情愿,似乎学者们更应当感谢财主,因为如无财主的支援,他们的研究成果永远不能发表于世,而这些财主没有用这些钱去吃喝玩乐,而是慷慨地支持了神圣的科学事业。但是,我认为,这是对科学精神的赤裸裸的亵渎,必将导致科学精神的堕落。

马克思曾经指出,在他那个时代,“不偏不倚的研究让位于豢养的文丐的争斗,公正无私的科学探讨让位于辩护士的坏心恶意。”^①在科学上为了张扬“不偏不倚的研究”和“公正无私的科学探讨”,我们还应当阻止科学成为金钱的奴仆。

四

我们的话题似乎自然而然地延伸到知识分子问题。中国社会正在发生深刻的变化。在这个伟大变革中,知识界的情况尤为引人注目。这些年我们看到知识分子队伍正在发生分化。

首先,一批知识分子“投笔从政”。中国知识分子历来就有强烈的社会参与意识。对各人来讲,其动机是多种多样的,有出自社会责任感的,有出自权势欲的,也有出自其他各种私人利益的。“学而做

^① 马克思. 资本论. 北京:人民出版社,1975. 17

官”历来就是中国广大读书人的人生哲学。在中国，不论过去还是现在，一般人都认为，做官最吃香。“学问”不过是实现升官发财的“敲门砖”。因此，现今一些读书人“投笔从政”，是历史传统的延续。但是，不管怎样，一大批知识分子的从政，正在改变当前中国社会官僚阶层的人员构成，这将导致这一阶层结构的改变。

其次，一批知识分子正在“投笔从商”。中国的读书人历来就瞧不起做买卖的。但是，这一传统正在改变。一批知识分子不仅羡慕“经商”，而且亲自去“经商”。这是我们在这几年所看到的最伟大的历史壮举。这是对中国儒家传统的反叛。中国知识分子的新生将由此开始。这一转变并不像一般人所想的那样降低知识的地位，损坏知识分子的形象，而是显示知识的伟大力量、提高知识分子人格的必经之路。由于知识分子“投笔从商”，中国“商人”阶层的结构正在发生根本性的变化，而这一变化乃是中国社会高速发展的一个必要条件。

其三，一批知识分子正在“走向世界”。这些年，一批中国知识分子“背井离乡”，步入世界各国，在新的环境中艰辛地开辟着新的生活。我并不否认“人才外流”对中国发展的暂时的不良影响。但是，这一潮流将对世界的未来产生不可估量的积极影响。大批东方人（包括中国人、韩国人、日本人以及其他东方人）涌入西方社会，使东方文化在西方社会广泛传播。有朝一日，西方人会发现他们正在东方化，正如东方人已经感受到自己正在西方化一样。东西方文化的碰撞与交融是产生全人类新文化的一个重要契机。从中得益的不仅是东方人，而且是西方人，总之是整个人类。

最后，大多数知识分子是“没有走掉的老九”。就其中多数而言，他们坚守着传统观点，热爱自己的知识事业，但他们在生活上清贫，事业上艰难。这些年人们常谈论的“知识分子的地位问题”也就是这批“老九”的地位问题。这个问题已经谈了十多年。是否像有些人所

说的那样他们的经济地位“每况愈下”，我不清楚。但是，他们与社会其他阶层的反差已经扩大，似乎是事实。这批“老九”的代言人一直在呼喊，要改善他们的生活待遇，但是问题总是得不到解决。原因在哪里呢？我认为，问题不在于“领导”，不在于他人，而在于他们自己。如果说工人阶级的解放是工人阶级自己的事情，那么，知识分子也应当自己提高自己的社会地位和经济地位。一方面固守着传统，另一方面希望别人来提高自己的地位，是永远不能成功的。寄希望于恩赐是不会有结果的。知识分子应当勇敢地与传统决裂，以自己的行动为自己争得应有的地位。

总之，正在发生的知识分子队伍的分化是历史的必然。几千年来，传统正在被摧毁。广大“没有走掉的老九”如果不想做落伍者，就必须成为改革的先锋。那么，他们就能在推进社会改革的同时，为自己争得与自己的才华相称的社会经济地位。

五

在过去的十多年间，哲学界对系统科学的重视是众所周知的事情。我从小喜欢哲学，哲学一直是我的一种业余爱好。这些年我一直关注哲学界关于系统科学哲学问题的讨论，我自己也写过几篇这方面的文章。我认为，这些年的确出现过一些高水平的讨论系统科学哲学问题的论文，但总的说来那种把系统科学中最一般性的结论直接当作哲学观点或哲学原理的廉价思维笼罩着系统哲学界。

针对这种情形，1984年我发表了“评当前哲学界的‘系统热’”^①。这篇文章在当时的系统哲学界产生了一定的影响。有些人人为之高兴，有些人人为之气愤。不过，无论赞赏它的人还是反对它的人都认为我

① 朴昌根. 评当前哲学界的“系统热”. 复旦学报(社会科学版), 1984. (4): 22—28

是在反对哲学界的“系统热”。实际上,与他们的想法正好相反,我的目的是推动“系统热”。我只是希望深沉的思考取代浅薄的议论,脚踏实地的研究取代哗众取宠的说教。但是,事与愿违,无论我所受到的赞赏还是批判,都使我感到乏味。我考虑到如果我继续参与那种毫无价值的争论,就会浪费自己的精力与时间,这样我就退出争论,专心去研究自己感兴趣的具体问题。

在这部著作中,我也很少谈论哲学问题。在这里,我仅就科学与哲学的关系问题发表自己的观点。一般来讲,哲学以科学为基础,科学以哲学为指导。马克思曾经说道:“理论在一个国家的实现程度,决定于理论满足这个国家的需要的程度。”^①相仿地,我们可以说,哲学在一门科学中的实现程度,决定于哲学满足这门科学的需要的程度。但是科学在不断发展,科学的需要也在不断发展。哲学只有随着科学及其需要的发展而发展,才能跟上科学发展的步伐,才能为科学发展提供行之有效的思维方式,才能使哲学本身永葆青春的活力。哲学没有资格检验科学的正确与否,倒是应当经受科学事实的锤炼。哲学的生命力不在于它的既有结论是否由科学的自然发展中得到验证,而在于它能否主动地积极地为科学发展做出贡献。科学从不满足于抽象的哲学结论,而哲学也不能满足于具体的科学结论。这些一般原理完全适用于系统科学与哲学的关系。

六

现在,我想回过头来谈谈本书。按照我原定的计划,本书是其中的第一部著作,其余三部是系统方法论基础、系统工程学基础和系统论(或系统哲学)基础。后面的三部著作能否完成,何时能完成,目前

① 马克思恩格斯选集(第一卷).北京:人民出版社,1966.9

我无法做出任何诺言。但是由于有了这一计划,本书尽可能不涉及其余三本书中可能包含的内容。

本书的主要目的是系统地阐述系统学的基本概念、基本原理和基本规律。另一方面,作为一本入门书,我尽量以通俗的方式叙述这些内容。我相信,具有理工科大学文化程度的读者完全可以理解书中的全部或绝大部分内容。那些具有大学文科文化程度的读者在阅读部分章节时会感到一些困难,但是只要认真地读下去还是能理解本书的基本内容。书中的大量图解会有助于他们从直观上理解用数学式子说明的部分。

对于系统思想的历史发展的叙述部分,可能有人批评我没有写中国人的系统思想。我坦率地承认我对中国历史上的系统思想没有作过专门的研究,但我一字未提它的主要原因在于:虽然中国历史上许多哲人的学说中包含着丰富的“系统思想”^①,但是这些思想对于系统科学发展的实际过程没有起过什么作用。尽管一些系统科学家现在经常引用中国哲人的某些字句,但这并不表明这些字句在他们的研究中起过某种促进作用。我认为,无论何时,我们都应当尊重事实。当然,我决不排除中国和国外的某些系统科学家将来有可能在中国历史上的“系统思想”的启迪下取得新成果的可能性,也希望这种可能性变成现实。但这终究是未来,而不是过去。

这本书不是哲学著作,也没有资格成为哲学著作。但是,我相信,如本书中的哲学部分对系统科学家们会有所裨益一样,书中的科

① 这几年,我在对日韩科技史进行比较的过程中,也对中西传统科学和科学思想作了一些比较。我所得到的几个结论是:(1)中国传统科学绝大部分研究成果未能形成系统的理论体系,惟一的例外是中国传统医学。(2)通常被许多学者看作是“系统思想”的传统时代中国科学上的一些基本观点,实际上并不是现代人所说的“系统思想”,而是整体论观点。(3)中国传统医学之所以能建立较系统的理论体系,是因为在这个领域居于支配地位的是类似于现代“系统思想”的科学思想。——参看:朴昌根.从与西方传统科学的比较看东亚传统科学的走向.见:全球化与韩国的应对.汉城:白山资料院,2003.384—407;另见本书修订版前言。

学部分也会对哲学家们有所裨益。不仅如此,假如某些读者把这本书当作哲学书来读,也不会失望的。他们从本书中可吸取的东西也许要比从一些哲学读物中所能吸取的多一些。

如前面所说,这本书是我多年学习和研究的结果。回想起来,长年累月的读书与写作生活犹如“班房”生活。为了完成这本书,我竭尽了全力。但是由于自己水平有限,又急于完成而时间仓促,错误和缺点肯定不少。希望各位读者不吝赐教。如果本书对那些有志于学习和研究系统学的读者能有所帮助,我就心满意足了。

七

在多年的研究工作中,我得到了许多人的帮助、支持和鼓励。

我感谢贝塔朗菲、哈肯、米勒、普里戈金和槌田敦等学者。他们的理论使我认识了一个新的世界——“系统”的世界。如无他们的理论和著作,我就绝对不可能写出这本书。

感谢钱学森、张钟俊、顾基发等系统科学界的著名学者。钱先生的论著使我开阔了眼界,张先生和顾先生每当见到我时总是鼓励我努力。

感谢李继宗、邹珊刚、黄麟维、陈忠、王顺义等诸位先生。与他们的友谊和经常的交流给了我力量。

我特别感谢上海机械学院工程系原系主任车宏安先生和其他诸位老师。在过去的许多年间,他们给我提供了良好的工作环境,使我能安下心来钻研系统理论。

我还要感谢许多听过我系统科学课的研究生们。他们不仅听了我的课,而且经常向我提出了值得探讨的问题。与他们的讨论是我澄清许多问题的重要途径之一。

当然,我还应当感谢四川教育出版社,她在出版学术著作十分困

难的现在仍决定出版本书,实令我感激万分。如无该社的支持,本书书稿恐怕要在我书桌的抽屉里痛苦地呻吟许久。我尤应感谢该社的赵璧辉先生和本书的责任编辑。

最后,我要感谢我的妻子。如无她的理解和支持,我是无法完成这本书的。对于我的孩子们,我只能表示深深的歉意。在他们的眼里,也许我只是一个在书桌前面坐着不动的机器人。

作 者

1992年8月于上海

目 录

修订版前言	1
第一版前言	19
第一章 系统学的历史发展	1
1.1 系统学与系统论	1
1.1.1 科学思想发展的三步曲	1
1.1.2 系统论在生物学上的历史发展	5
1.1.3 系统论在哲学上的历史发展	9
1.2 系统学与信息产业革命	15
1.2.1 信息产业革命的“硬件”	17
1.2.2 信息产业革命的“软件”	25
1.2.3 信息产业革命的“灵魂”	46
1.3 系统学史略	49
1.3.1 20 世纪 20—30 年代	50
1.3.2 20 世纪 40—50 年代	51
1.3.3 20 世纪 60—70 年代	52
1.3.4 20 世纪 80 年代以后	54
第二章 什么是系统学	56
2.1 系统学的研究对象	57

2.2	系统学的研究内容	59
2.2.1	什么是同型性	59
2.2.2	同型性的根据	61
2.2.3	同型性的分类	63
2.2.4	同型性的科学意义	65
2.3	系统科学的体系	68
2.3.1	贝塔朗菲的体系	69
2.3.2	市川博信的体系	72
2.3.3	钱学森的体系	74
2.3.4	我的方案	76
2.4	系统科学与其他科学的关系	84
2.4.1	科学知识结构等级的划分原则	84
2.4.2	现代科学知识结构等级	87
2.4.3	数学、哲学、系统学之间的关系	89
2.4.4	系统学的特征	93
2.5	系统学的研究方法	97
2.5.1	数学方法与非数学方法的结合	97
2.5.2	定性方法与定量方法的结合	97
2.5.3	实验方法与科学抽象的结合	98
2.5.4	传统方法与系统方法的结合	99
第三章	系统概念	100
3.1	什么是系统	100
3.1.1	各种系统定义	101
3.1.2	系统、要素、环境	110
3.1.3	系统与非系统	117
3.2	结构与功能	119

3.2.1 结构与功能:传统观点	119
3.2.2 结构与功能:新的探索	132
3.2.3 结构与功能的关系	154
3.3 子系统与分系统	170
3.3.1 子系统与分系统	170
3.3.2 若干实例	174
3.3.3 子系统—分系统矩阵	179
第四章 系统分类	186
4.1 系统分类原则	187
4.1.1 单一性原则	187
4.1.2 加和性原则	188
4.1.3 客观性原则	188
4.2 现实系统的分类	189
4.2.1 天然系统与人造系统	190
4.2.2 自然系统、社会系统和思维系统	191
4.2.3 物质系统和概念系统	191
4.2.4 生命系统和非生命系统	192
4.2.5 渺观、微观、宏观、宇观与胀观系统	193
4.2.6 小系统、中系统与大系统	194
4.2.7 硬系统与软系统	197
4.2.8 作业系统与管理系统	198
4.3 系统模型的分类	199
4.3.1 封闭系统与开放系统	200
4.3.2 开环系统与闭环系统	202
4.3.3 静态系统与动态系统	204
4.3.4 线性系统与非线性系统	205

4.3.5	连续系统与离散系统	207
4.3.6	确定性系统与不确定性系统	209
4.3.7	黑色系统、白色系统与灰色系统	212
4.3.8	简单系统与复杂系统	214
第五章	系统性质	220
5.1	整体性	220
5.1.1	整体性	220
5.1.2	系统质与要素的四因素	222
5.1.3	系统与要素之间的三种关系	228
5.2	稳定性	232
5.2.1	稳定性	232
5.2.2	李亚普诺夫稳定性	233
5.2.3	输入—输出稳定性	239
5.2.4	结构稳定性	240
5.3	等级性	247
5.3.1	等级性	247
5.3.2	若干实例	249
5.3.3	等级性与并列性	260
5.4	适应性	263
5.4.1	适应性	263
5.4.2	可靠性	271
5.4.3	整序性	277
5.5	历时性	281
5.5.1	时间	282
5.5.2	变化需要时间	286
5.5.3	时间导致变化	289

第六章 信息与熵	297
6.1 系统与信息	297
6.1.1 系统的三基元	297
6.1.2 什么是信息	300
6.1.3 信息的度量	308
6.2 系统与熵	313
6.2.1 熵的简史	313
6.2.2 什么是熵	321
6.2.3 问题与讨论	328
6.3 熵与生命·社会·经济系统	340
6.3.1 物质系统的套箱结构	340
6.3.2 熵与生命系统	342
6.3.3 熵与经济系统	346
第七章 系统进化	364
7.1 进化论的进化	364
7.1.1 进化论从猜想到科学的发展	365
7.1.2 进化论在 20 世纪的新发展	369
7.1.3 进化论发展的新阶段——系统进化论	373
7.2 若干基本范畴	377
7.2.1 开放性与封闭性	377
7.2.2 自组织与他组织	379
7.2.3 量变与质变	383
7.2.4 渐变与突变	389
7.2.5 对称与非对称	391
7.2.6 有序与无序	393
7.2.7 平衡与非平衡	395

7.2.8	线性与非线性	395
7.2.9	可逆与不可逆	395
7.2.10	偶然与必然	397
7.2.11	内因与外因	399
7.2.12	协同与竞争	402
7.3	系统进化方程及其讨论	404
7.3.1	典型现象	404
7.3.2	系统进化方程	411
7.4	分叉与相变	434
7.4.1	系统进化中的质变	434
7.4.2	分叉	438
7.4.3	相变	452
7.5	系统进化的方向性与周期性	460
7.5.1	层间进化与层内进化	460
7.5.2	层内进化的描述	463
7.5.3	系统进化的周期性	475
7.6	系统进化的因素与判据	496
7.6.1	系统进化的因素	496
7.6.2	系统进化的判据	507
附录	现代系统理论研究概况	517
F.1	以生物学和/或心理学为背景的系统理论	520
F.1.1	贝塔朗菲的一般系统理论	520
F.1.2	米勒的一般生命系统理论	522
F.1.3	艾根的超循环理论	524
F.2	以物理学为背景的系统理论	529
F.2.1	普里戈金的耗散结构理论	529

F. 2. 2	哈肯的协同学	535
F. 2. 3	槌田敦的资源物理学	539
F. 3	以数学为背景的系统理论	546
F. 3. 1	梅萨洛维克体系	546
F. 3. 2	怀莫尔体系	548
F. 3. 3	克里尔体系	550
F. 3. 4	托姆突变理论	552
F. 3. 5	曼德勃罗的分形几何学	557
F. 4	以控制论和/或信息论为背景的系统理论	566
F. 4. 1	控制论和控制理论	566
F. 4. 2	屈弗缪勒的系统理论	567
F. 4. 3	法乌热与德培罗的系统理论	567
F. 4. 4	卡尔曼的系统理论	568
F. 4. 5	一些苏联学者提出的“系统学”	568
F. 4. 6	福雷斯特的系统动力学	569
F. 4. 7	其他	569
F. 5	以社会科学为背景的系统理论	570
F. 5. 1	作为管理技术的系统理论	570
F. 5. 2	经济学基础理论研究中的一个新思潮	572
F. 5. 3	巴克莱的社会系统理论	573
F. 5. 4	伽拉捷达吉的社会动力学	575
F. 5. 5	公文俊平的社会系统理论	580
F. 6	以哲学为背景的系统理论	584
F. 6. 1	拉兹洛的系统哲学	584
F. 6. 2	邦格的社会系统主义	586
F. 6. 3	一些马克思主义哲学家的系统观点	588
参考文献		594

Introduction to Systemology

Contents

Preface to the Revised Edition	1
Preface to the First Edition	19
 Chapter 1 Historical Developments of Systemology	1
1.1 Systemology and Systemism	1
1.1.1 A Trilogy on Developments of Scientific Thoughts	1
1.1.2 Historical Developments of Systemism in Biology	5
1.1.3 Historical Developments of Systemism in Philosophy	9
1.2 Systemology and the Information Industrial Revolution	15
1.2.1 “Hardwares” in the Information Industrial Revolution	17
1.2.2 “Softwares” in the Information Industrial Revolution	25
1.2.3 “Spirits” in the Information Industrial Revolution	46

1.3	The Brief History of Systemology	49
1.3.1	From 1920's to 1930's	50
1.3.2	From 1940's to 1950's	51
1.3.3	From 1960's to 1970's	52
1.3.4	Since 1980's	54
Chapter 2	What Is Systemology	56
2.1	Research Objects of Systemology	57
2.2	Research Contents of Systemology	59
2.2.1	What Is Isomorphism	59
2.2.2	Grounds for Isomorphism	61
2.2.3	Classification of Isomorphisms	63
2.2.4	The Scientific Meaning of Isomorphism	65
2.3	Frameworks of Systems Science	68
2.3.1	The Framework by Bertalanffy	69
2.3.2	The Framework by Ichikawa	72
2.3.3	The Framework by Qian Xuesen	74
2.3.4	The Scheme by Me	76
2.4	Relations between Systems Science and Other Sciences	84
2.4.1	Differentiating Principles of Structural Hierarchies of Scientific Knowledge	84
2.4.2	Structural Hierarchies of Modern Scientific Knowledge	87
2.4.3	Relations between Mathematics, Philosophy and Systemology	89
2.4.4	Some Characteristics of Systemology	93

2.5 Research Methods for Systemology	97
2.5.1 Combination of Mathematical and Non-Mathematical Methods	97
2.5.2 Combination of Qualitative and Quantitative Methods	97
2.5.3 Combination of Experimental Methods and Scientific Abstractions	98
2.5.4 Combination of Traditional Methods and Systems Methods	99
Chapter 3 System Concepts	100
3.1 What Is System	100
3.1.1 Various Definitions of System	101
3.1.2 System, Element, and Environment	110
3.1.3 System and Non-System	117
3.2 Structure and Function	119
3.2.1 Structure and Function: Traditional Conceptions	119
3.2.2 Structure and Function: New Exploration	132
3.2.3 Relations between Structure and Function	154
3.3 Subsystem: Part System and Sector System	170
3.3.1 Part System and Sector System	170
3.3.2 Some Examples	174
3.3.3 Part System-Sector System Matrix	179
Chapter 4 Classification of Systems	186
4.1 Classification Principles of Systems	187

4. 1. 1	Singleness	187
4. 1. 2	Additivity	188
4. 1. 3	Objectiveness	188
4. 2	Classification of Real Systems	189
4. 2. 1	Natural and Artificial Systems	190
4. 2. 2	Natural, Social and Thinking Systems	191
4. 2. 3	Material and Conceptual Systems	191
4. 2. 4	Living and Non-Living Systems	192
4. 2. 5	Tiny, Micro, Macro, Cosmic, and Expanding Systems	193
4. 2. 6	Little, Middle, and Large Systems	194
4. 2. 7	Hard and Soft Systems	197
4. 2. 8	Operational and Managemental Systems	198
4. 3	Classification of System Models	199
4. 3. 1	Closed and Open Systems	200
4. 3. 2	Open and Closed Loop Systems	202
4. 3. 3	Static and Dynamic Systems	204
4. 3. 4	Linear and Nonlinear Systems	205
4. 3. 5	Continuous and Discrete Systems	207
4. 3. 6	Deterministic and Non-Deterministic Systems	209
4. 3. 7	Black, White, and Grey Systems	212
4. 3. 8	Simple and Complex Systems	214
Chapter 5	System Properties	220
5. 1	Wholeness	220
5. 1. 1	Wholeness	220

5. 1. 2	Quality of System and Four Factors of Element	222
5. 1. 3	Three Kinds of System-Element Relations	228
5. 2	Stability	232
5. 2. 1	Stability	232
5. 2. 2	Lyapunov Stability	233
5. 2. 3	Input-Output Stability	239
5. 2. 4	Structural Stability	240
5. 3	Hierarchy	247
5. 3. 1	Hierarchy	247
5. 3. 2	Some Examples	249
5. 3. 3	Hierarchy and Juxtaposition	260
5. 4	Adaptability	263
5. 4. 1	Adaptability	263
5. 4. 2	Reliability	271
5. 4. 3	Orderability	277
5. 5	Diachrony	281
5. 5. 1	Time	282
5. 5. 2	Change Needs Time	286
5. 5. 3	Time Causes Change	289
Chapter 6	Information and Entropy	297
6. 1	System and Information	297
6. 1. 1	Basic Components of System	297
6. 1. 2	What Is Information	300
6. 1. 3	Measure of Information	308
6. 2	System and Entropy	313

6. 2. 1	The Brief History of Entropy	313
6. 2. 2	What Is Entropy	321
6. 2. 3	Questions and Discussions	328
6. 3	Entropy in Living, Social, and Economic Systems	340
6. 3. 1	Chinese Boxlike Structure of Material Systems	340
6. 3. 2	Entropy and Living Systems	342
6. 3. 3	Entropy and Economic Systems	346
Chapter 7	Systems Evolution	364
7. 1	Evolution of Evolutionary Theory	364
7. 1. 1	Developments of Evolutionary Theory from Supposition to Science	365
7. 1. 2	New Developments of Evolutionary Theory in the 20 th Century	369
7. 1. 3	The New Stage of Developments of Evolutionary Theory——Systems Evolutionary Theory	373
7. 2	Some Fundamental Categories	377
7. 2. 1	Openness and Closedness	377
7. 2. 2	Self-Organization and Hetero-Organization	379
7. 2. 3	Quantitative Change and Qualitative Change	383
7. 2. 4	Gradual Change and Sudden Change	389
7. 2. 5	Symmetry and Asymmetry	391
7. 2. 6	Order and Disorder	393
7. 2. 7	Equilibrium and Non-Equilibrium	395
7. 2. 8	Linearness and Nonlinearness	395

7.2.9	Reversibility and Irreversibility	395
7.2.10	Chance and Necessity	397
7.2.11	Internal Cause and External Cause	399
7.2.12	Synergy and Competition	402
7.3	Evolution Equations of System and Discussions about Them	404
7.3.1	Typical Phenomena	404
7.3.2	Evolution Equations of System	411
7.4	Bifurcation and Phase Transition	434
7.4.1	Qualitative Changes in Systems Evolution	434
7.4.2	Bifurcation	438
7.4.3	Phase Transition	452
7.5	Directionality and Cyclicity of Systems Evolution	460
7.5.1	Inter-Level Evolution and Intra-Level Evolution	460
7.5.2	Description of Intra-Level Evolution	463
7.5.3	Cyclicity of Systems Evolution	475
7.6	Factors and Criteria of Systems Evolution	496
7.6.1	Factors of Systems Evolution	496
7.6.2	Criteria of Systems Evolution	507
Appendix: Research Survey of Modern Systems Theories		517
F.1	Systems Theories with Biological and/or Psychological Background	520
F.1.1	Bertalanffy's General System Theory	520
F.1.2	Miller's General Living Systems Theory	522
F.1.3	Eigen's Theory for Hypercycle	524

F. 2	Systems Theories with Physical Background	529
F. 2. 1	Prigogine's Dissipative Structure Theory ...	529
F. 2. 2	Haken's Synergetics	535
F. 2. 3	Tsuchida's Resource Physics	539
F. 3	Systems Theories with Mathematical Background	546
F. 3. 1	Mesarovic's Approach	546
F. 3. 2	Wymore's Approach	548
F. 3. 3	Klir's Approach	550
F. 3. 4	Thom's Catastrophe Theory	552
F. 3. 5	Mandelbrot's Fractal Geometry	557
F. 4	Systems Theories with Background of Cybernetics and/or Information Theory	566
F. 4. 1	Cybernetics and Control Theories	566
F. 4. 2	Küpfmüller's Systems Theory	567
F. 4. 3	Systems Theory of Faurre and Depeyrot ...	567
F. 4. 4	Kalman's Systems Theory	568
F. 4. 5	Systemology by Some Soviet Scholars	568
F. 4. 6	Forrester's Systems Dynamics	569
F. 4. 7	Other Theories	569
F. 5	Systems Theories with Social Science Background	570
F. 5. 1	Systems Theories in Managing Technique	570
F. 5. 2	A new Trend in Basic Researches of Economics	572
F. 5. 3	Buckley's Social Systems Theory	573
F. 5. 4	Gharajedaghi's Social Dynamics	575
F. 5. 5	Kumon's Social Systems Theory	580
F. 6	Systems Theories with Philosophical Background	584

F. 6. 1	Laszlo's Systems Philosophy	584
F. 6. 2	Bunge's Social Systemism	586
F. 6. 3	Systems Viewpoints of Some Marxist Philosophers	588
References		594

第一章 系统学的历史发展

按照中国系统科学界广泛认同的理解,系统学是系统科学的基础理论。为了了解系统学,有必要首先了解整个系统科学的一般情况。因此,本章将在整个系统科学的历史发展中考察系统学的历史发展。

一般来讲,一门新兴科学的产生与发展需要从三个方面考察。其一是与该新兴科学相关的其他科学领域的发展,其二是与之相关的科学思想的发展,其三是与之相关的生产与社会实践的发展。就与科学思想和生产实践的关系而言,系统学的产生和发展是与现代科学思想——系统论的产生和发展分不开的,而系统学的现实基础首先在于信息产业革命。

1.1 系统学与系统论

系统学以系统论为思想基础,而系统论以系统学为科学基础。无论从系统学发展的历史事实看,还是从系统学与系统论的逻辑关系看,系统论和系统学的形成和发展是一个相辅相成的辩证过程。这里,将要讨论系统论的基本内容与发展历程。

1.1.1 科学思想发展的三步曲

每一时代的科学思想,都是一种历史的产物。在不同的历史时

代,科学思想具有非常不同的内容,因而具有非常不同的形式。纵观科学思想发展史,我们就不难发现,从古代到现代的科学发展中,围绕如何看待整体与部分的关系,先后形成了三种科学思想即整体论、部分论和系统论^①。

1.1.1.1 整体论

在古代科学中,占统治地位的是整体论。当时,人们还无法了解各种自然现象的细节,只能从直观上把整个自然界看成一个整体,笼统地从总的方面考察自然界,从中形成的是整体论。

在整体论看来,唯一实在的是整体,而不是其组成部分;整体是超越其组成部分的总体,部分只是由于或为了整体才存在的附属品;整体具有格式塔性质或总括性,这种性质是在整体层次上突现的,既不能还原为各部分的性质也不能归结于各部分的相互作用;整体的变化是超越其部分的独立事件。从而整体论主张,只要研究整体的总括性及其变化就能正确地把握整体。

整体论科学思想尽管来自古代的自然研究,但是又深深扎根于当时的社会现实。当时的统治者把自己当作社会整体和国家的化身,把千百万人民当作自己的奴仆,肆意扼杀他们的个性。因此,从某种意义上说,科学上的整体论无疑是这种社会现实在科学领域里的折射。从20世纪中期的法西斯主义中也可以看到整体论在社会生活中的反射。例如,墨索里尼(Benito Mussolini, 1883—1945)曾说道:对于法西斯主义来说,国家是绝对的,个人和群体是相对的;个人、群体、政党、协会、经济联合会或社会阶级都不能离开国家而独立存在^②。

^① Bunge M. A System Concept of Society. Beyond Individualism and Holism. In: GENERAL SYSTEMS, 1979. Vol. XXIV:27—44

^② Modern History Sourcebook: Benito Mussolini; *What is Fascism*, 1932. <http://www.fordham.edu/halsall/mod/mussolini-fascism.html>

1.1.1.2 部分论

通常所说的机械论、还原论、个体论、原子主义等都属于这一科学思想范畴。

在近代科学中,占统治地位的是部分论。在近代人和现代人看来,整体论的错误和局限性是显而易见的。当自然科学摆脱宗教的枷锁并解开自然之谜的时候,人们不再满足于对自然界和社会的朦胧的认识,开始打破整体的神秘外壳,到整体内部去探索其中的奥秘。他们看到了构成整体的各个部分,又看到了部分的部分。这无疑是一种进步,但是却蕴含着某种意义上的退步,因为对整体各部分的无穷尽的探索使得他们忘记了自己所探索的终究是整体的、存在于整体中的部分。这种无休止的探索来自当时的科学思想即部分论。

在部分论看来,惟一实在的是部分,而不是整体;整体是各部分的集合,超越各部分的整体是观念上的而不是具体的存在;整体作为一个总体是一个抽象概念,因而不具有突现性或总括性,整体的每一种性质都是各部分性质的组合或聚集;整体的变化乃是各部分变化的总和。从而部分论认为只要逐一研究各部分就能正确地把握整体。

产生部分论的社会背景是资产阶级的兴起和发展。在当时的历史条件下,新生的资产阶级为了求得生存和发展,为了推翻封建专制制度,竭力主张私有财产神圣不可侵犯,极力宣扬个人自由至高无上,公开吹捧赤裸裸的利己主义。这种社会政治观点在科学上便折射为只强调部分、蔑视整体的部分论科学思想。显然,前者又成为后者的强有力的保护伞。

1.1.1.3 系统论

系统论亦可称为新整体论或系统观。

从20世纪20—30年代起,开始出现了一种新的科学思想即系

统论。系统论开始在现代科学中占主导地位。无论从逻辑上看还是从科学思想的历史发展上看,系统论是批判地吸收整体论和部分论的合理内容而建立起来的。当人们在整体内部沿着无休止地追求整体的各个部分的道路进军的时候,人们终于发现离开整体去探索部分是没有出路的。特别是在爱因斯坦(Albert Einstein, 1879—1955)的相对论和玻尔(Niels Henrik David Bohr, 1885—1962)、海森堡(Werner Karl Heisenberg, 1901—1976)、薛定谔(Erwin Schrödinger, 1887—1961)等人的量子力学诞生之后,波与粒子之间的绝对对立被波粒二象性取代,相互作用变成物理学的事实。人们认识到一味追求整体之部分、部分之部分的研究方法已走进了绝路,至少不是惟一正确的研究方法。事实告诉人们,存在着另一条研究路线,它要求揭示部分与部分之间的关系、部分与整体之间的关系。尤其在人们改造自然的斗争中,部分论要为新的科学思想让位已成为历史的必然。应运而生的便是系统论科学思想。

在系统论看来,整体和它的各部分都是实在的;整体既不是各部分的单纯聚集,也不是超越其各部分的抽象总体,而是一个由相互关联的各部分构成的统一体即系统;整体作为一个系统,具有总括性,这种性质是在整体层次上突现的,是基于各部分及其相互关联而存在的,但又不同于各部分的特性;整体的变化是系统结构的变化,因此是整体层次和部分层次上的变化。从而系统论主张,为了正确地把握整体,就应该既研究整体各部分的性质和变化,也研究整体自身的性质和变化。

产生系统论的社会背景可以这样来解释:资本主义社会的各种弊端从反面告诉人们,一方面,如无全人类的彻底解放,任一社会个人或社会阶级都不能取得彻底解放,另一方面,每个人的自由发展是全人类自由发展的条件。就眼前的现实而言,如无世界各国以及全球的共同繁荣,任一国家的繁荣都不可能长久。这样的社会背景成

为产生系统论的社会温床。

从上可知,整体论和部分论只有部分的真理,因为部分论忽视整体的突现性质,而整体论虽然承认这种突现性质,但不去深入研究这种性质的来源。系统论摆脱了这种局限性。它把整体论和部分论的合理内容,尤其把部分论的精明而讲究实际的观点和整体论的强调整体和突现的观点结合在一起,同时把整体论和部分论的错误观点予以否定。因此,如果说部分论是对整体论的第一次否定,那么系统论则是否定之否定。这就是几千年来科学思想发展的辩证过程,也就是系统论之产生和发展的逻辑的和历史的过程。

1.1.2 系统论在生物学上的历史发展

我们在诸多科学领域都可以发现系统论科学思想的萌芽形式或某种具体形式。但是,因为生物学所研究的是活生生的有机体,所以系统论科学思想较完善的发展形式首先出现在生物学领域。尽管如此,系统论在生物学领域的发展还是经历了与整体论和部分论的长期斗争。

在生物学领域,整体论的具体形式为活力论(或称生机论),部分论的表现形式为机械论(一般地说,部分论的近代形式也就是机械论),而系统论的表现形式为机体论。这三种科学思想的分歧在生物学领域突出地表现在如何解释生命的本质这一根本问题上。围绕生命的本质,从古代到20世纪20年代一直存在着活力论和机械论的斗争。

古希腊的亚里士多德(Aristotle,前384—前321)是生物学活力论的鼻祖,而盖仑(Claudius Galen,约129—200)把活力论应用于具体生理现象研究。在他们看来,灵魂是形式,活力是质料,因而活力把灵魂当作目的来实现。他们的生命理论是目的论的活力论。例如,亚里士多德把生物分为三大类型:植物型,靠生殖灵魂表现出生

长活动;动物型,靠感觉灵魂自己走动;人型,靠理性灵魂表现出智力。盖仑则设想三级灵魂与三级活力相对应,而三级活力的基础在于三种内部器官即消化、呼吸和神经系统,而且它们都来自一个共同活力——灵气。

机械论生命观同近代科学一起登上历史舞台。1543年是革命的一年,它不仅为天文学贡献了哥白尼(Nicolaus Copernicus, 1473—1543)的《天体运行论》,而且为生物学贡献了维萨里(Andreas Vesalius, 1514—1564)的《人体的构造》;前者是近代天文学的开始,后者则是近代解剖学的开端。此后,哈维(William Harvey, 1578—1657)创立近代生理学,用机械运动描述了心脏机能和血液循环,又有伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)用材料力学的观点解释大象需要粗腿而昆虫可由纤细的腿支撑它的躯体,这可视为生物力学的萌芽。

机械论在笛卡儿(René Descartes, 1596—1650)那里获得了最完美的形式。他在哲学上是二元论者,而在自然科学上是一个坚定的机械论者。他认为:世界上存在着两种实体即心灵和物质。它们由超乎其上的绝对实体——上帝创造出来并被置之不理。在现实世界中心灵和物质互不相干,绝对对立。物质世界的一切包括无机物、动植物和人体都是遵循力学规律的机器。但是,笛卡儿作为一个虔诚的基督教徒,给力学规律设置了一个限界:人不是纯粹的机器,人具有不服从自然规律(即力学规律)的心灵。他主张机械因果论,主张一切运动(包括机体的运动)都可以还原为物质微粒的单纯位置移动。笛卡儿只把动物和人体看作机器,而拉美特里(Julien Offroy de La Mettrie, 1709—1751)把人本身(包括肉体 and 心灵)看作一台机器。

在近代科学中最早真正恢复亚里士多德活力论生命观的是燃素说的倡导者斯塔耳(Georg Ernst Stahl, 1660—1734)。他反对笛卡儿的动物即机器的观点,认为活力即“有感觉的灵魂”弥漫于生物体

内并直接控制着生物体内的一切化学过程和其他过程;活力是生命的终极原因,是生命活动的统一性和完整性的源泉。显然,斯塔尔使莱布尼茨(Gottfried Wilhelm von Leibniz, 1646—1716)的能动的精神实体——单子再现于生物学。

斯塔尔的活力论后经毕夏(Marie Francois Xavier Bichat, 1771—1802),在18世纪后半叶波及整个生物学领域。后来杜里舒(Hans Driesch, 1867—1941)又把它发展成为新活力论。他发现一个海胆受精卵经过一次至五次分裂而产生的各细胞,即使人工地加以分割也都会发育成为完整胚胎。他又发现两个海胆受精卵在两块玻璃板之间被挤压亦可结合而发育成为一个完整胚胎。据此,他认为每一受精卵内部都存在着一种内在活力或目的,以保持胚胎的完整性并能使丧失的部分再生。他进一步认为,物理-化学的生命观已经彻底破产,胚胎和所有有生命物都含有活力,它根本上不同于物理-化学的力,但控制着预先给定的有目的的生命活动。他又认为,既然可以从不同的起点,通过不同的路线,达到同一的结果,因果论和决定论也就彻底破产了,因而机械论也就失去了存在的理由。

可见,机械论者正确地指出为弄清生命现象就必须研究生命现象赖以发生的机械、物理、化学过程,而活力论者正确地指出生命现象不能归结为机械、物理、化学过程,但是机械论者未能说明生物体的统一性、秩序、组织和自调节性等,活力论者试图回答这些问题,但不是去推翻机械论的错误,而是从机械论的错误出发,除了从外部加进一种超自然的活力外什么也没有做。因此,活力论只不过是机械论添加活力而已。贝塔朗菲正确地指出:机械论和活力论都建立在分析—相加的观点和机器理论的基础上。

在贝塔朗菲看来,机械论和活力论都没有揭示解决生命本质问题的正确方向。这样,他提出机体生物学,试图以此解释生命的本质。他的机体论可归纳为整体性、动态结构、能动性和组织等级观

点。在他看来,首先,生物体是一种开放系统,生命的本质不仅要从生物体各组成成份的相互作用,而且要从生物体与环境的相互作用中说明;生物体是在时空上有限的具有复杂结构的一种自然物整体,从作为一个有机整体的生物体中分割出来的部分截然不同于生物体中起作用的部分;生物体各组成部分离开整体是不能存在的;就人而言,肉体和精神有着不可分割的联系。一般地说,分立部分的行为不同于整体的行为。其次,生物体结构是一种动态结构,与静态结构(如机器结构、晶体结构)有着本质区别:后者由不变的组成部分构成,前者则以其组成物质的不断变化为自身的存在条件。代谢作用是每一机体的基本特征,而由于代谢,机体的组成要素每时每刻都在发生变化,所以生物体与其说是存在的,不如说是发生的。在生物体中每一层次的存在总是以次级层次的生长、衰老和死亡为前提;动态结构有自调节性,而静态结构只有被动的更换性。第三,生物体不是一个被动系统,它首先是一个能动系统;生物体具有应激性,但其主要特征在于能动性,如心跳、呼吸等生理机能不是对外界刺激的反应,而是维持生存的内在要求的实现。第四,生命问题本质上是组织问题,而生物组织有等级性,所以生命现象必须在生物体组织的所有层次上,即物理-化学层次、基因层次、细胞层次、多细胞组织层次、器官层次、个体层次和由许多个体组成的群体层次上加以研究。

贝塔朗菲于1928年明确指出:“因为活物的基本特征是组织,对各部分和各过程进行研究的传统方法不能完整地描述生命现象。这种研究没有向我们提供协调各部分和各过程的信息。因此生物学的主要任务应当是发现在生物系统中(在组织的一切层次上)起作用的规律。”^①这一思想是系统论的萌芽,后来发展成为整个系统论的纲领。

^① Bertalanffy L. v. The History and Status of General System Theory. In: Klir G. J. (ed). *Trends in General Systems Theory*. New York: Wiley, 1972. 24--25

1.1.3 系统论在哲学上的历史发展

从科学思想的发展上看,虽然系统论深深扎根于生物学、物理学、数学和社会科学等,但它的思想源泉则是哲学辩证法。在某种意义上甚至可以说,系统论的母体是哲学辩证法;哪里有辩证法,那里就蕴含着系统论观点。

赫拉克利特(Heraclitus,约前 540—约前 480 与 470 之间)的辩证法是一切辩证哲学之源。他第一次明确地表述了直观的朴素的但本质上是正确的辩证的自然观。他把自然界当作一个整体来观察;在他看来,万物皆流,一切都在运动,即产生、变化和消失;运动的源泉在于对立的统一。柏拉图(Plato,前 427—前 347)把系统解释为秩序、正义和美的一种范例。亚里士多德是古希腊哲学的集大成者。他的“四因论”(关于质料因、形式因、动力因、目的因的思想)包含着两千多年来的哲学和科学所研究的全部基本问题,而他的整体论、目的论及其他许多思想乃是现代系统思想的直接来源之一。

中世纪的经院哲学扼杀了亚里士多德学说中活生生的东西,而使其中僵死的东西万古不朽。但是 13 世纪末至 14 世纪初,司各特(Johannes Duns Scotus,1266—1308)从神学那里为哲学争得了半天天下,而奥卡姆(William of Occam,约 1285—约 1349)结束了经院哲学独霸中世纪的局面。神秘主义者尼古拉[库萨的](Nicolaus Cusanu,1401—1464)也给经院哲学以沉重打击。他克服古代和中世纪的地心说,告诉人们存在着无数宇宙,主张地动说。他在物理学、地质学和医学方面的工作为近代科学迎来了黎明。他用“对立物的一致”概念解释整体内部各部分之间的对立甚至对抗,并把整体看作较之部分高级的统一体。贝塔朗非高度评价并完全采纳了这一观点。

在近代史上,德国始终是辩证法的摇篮,虽然它同时又是客观唯心主义的圣地。贝塔朗非高度评价莱布尼茨的单子等级观点,指出:

“莱布尼茨的单子等级看来与现代系统等级很相似”^①。莱布尼茨认为单子根据知觉程度可分为四个等级,单子及其构成物从而就形成一个不同等级的连续发展系列。最低级的是只有一种“微小的知觉”的单纯的单子,如无生命物;高一级的单子是“灵魂”,它是具有比较清晰的知觉和记忆的单子,如一般动物;再高级的单子是“理性灵魂”或“精神”,它是“使我们与单纯的动物分开,使我们具有理性和各种科学,将我们提高到认识自己和上帝的东西”^②;最高级的单子是上帝,它是“惟一、普遍和必然的最高实体”,是“绝对完满的”^③。在他看来,只有上帝是原始的最初的单子,其他的单子都是它的产物,而这些产物,它们的“知觉”是逐步由低级向高级发展的。莱布尼茨的辩证思想还表现在实体能动性的思想和事物之间普遍联系的思想,他指出:“能动性是一般实体的本质”^④;由于单子的本性,存在着“一切事物对每一事物的联系或适应,以及每一事物对一切事物的联系或适应”^⑤。

德国古典哲学的奠基人是康德(Immanuel Kant, 1724—1804),而黑格尔(Georg Wilhelm Friedrich Hegel, 1771—1831)是德国古典哲学最伟大的代表,黑格尔的辩证法是唯心主义辩证法的最高形式。在他那十分庞大而似乎漫无边际的体系中,充满着辩证法,充满着类似于现代系统思想的观点。

他第一次把整个自然的、社会的和精神的世界描述为一个统一的系统,并指出它们都遵循统一的客观规律即辩证法。他认为一切事物和人的认识的发展是由简单到复杂、由低级到高级、由抽象到具体的辩证过程。

① Bertalanffy L. v. The History and Status of General System Theory. In: Klir G. J (ed). *Trends in General Systems Theory*. New York: Wiley, 1972. 22

②③④⑤ 十六—十八世纪西欧各国哲学. 北京:商务印书馆,1962. 297, 298, 328, 301

在他看来,绝对精神的发展是按照“正、反、合”的三段式进行的,而在它的内在深处起作用的是对立统一即矛盾。一切事物永远不会停留在一个状态,因为它的本质就是运动,即使在表面上没有得出显著的结果从而大踏步前进之前,辩证法仍然像鼯鼠一样在暗地里掘地。他指出:“矛盾是一普遍而无法抵抗的力量,在这个大力之前,无论表面上如何稳定坚固的事物,没有一个能够持久不摇”^①。

黑格尔关于全体与部分、相互作用、生命、有机体等概念的解释是与现代系统观点完全融洽的。例如,他辩证地论述全体与部分之间的关系,指出:“全体的概念必定包含部分。但如果按照全体的概念所包含的部分来理解全体,将全体分裂为许多部分,则全体就会停止其为全体”^②。他批判机械因果论,指出:相互作用就是互为前提和相互制约的实体互为因果。还有,在他看来,生命本身含有死亡的种子;单凭全体与部分之间的外在的机械的关系,不能真正认识有机体的生命;肢体和器官只有在活的机体中才是肢体和器官,这是“由于它们的统一性,并由于它们和统一性有联系”^③。

进入 20 世纪后,在贝塔朗菲正式提出一般系统理论之前,系统思想首先在哲学领域得到了巨大的发展。正如贝塔朗菲所指出,系统思想在哲学上的发展先于它在心理学和生理学上的发展^④。

哈特曼(Nicolai Hartmann, 1882—1950)于 1912 年强调系统观点的必要性。在他看来,并列简单因果链是不够的,本质的是相互作用。在一个系统中结构的相对稳定性依赖于各种力的平衡。同时,每一有限系统是较高级系统的一部分,又包含着许多较小系统。低级系统和高级系统之间存在着相互作用。活的存在是最复杂的结

①②③ 黑格尔. 小逻辑. 北京:商务印书馆,1980. 179, 282, 405

④ Bertalanffy L. v. *Problems of Life*. New York: Wiley, 1952. 196

构,其中相互作用尤为重要,它使一切个别过程结合成整体并用系统规律控制着它们的协调。他关于实在的分层理论在不同领域(无机界、有机界和精神界)提供了更高级更复杂的范畴。

当杜里舒在欧洲大陆上提倡活力论的机体思想时,在英国荷兰登(John Burdon Sanderson Haldane, 1892—1964)也对生命的机器理论进行了批判,更有怀特海(Alfred North Whitehead, 1861—1947)提倡了有机机械论。于是像德国的“格式塔”概念一样,机体论观点在英格兰扩展到无生命系统中去了。怀特海主张改造传统的科学体系,把它建立在机体这一最终概念的基础上。他认为:一切真的实体都是完整的整体,而整体的结构影响着各部分的特性。这一原理具有普遍性,并非活物特有。实际上原子、晶体、分子等皆无例外。这样,传统的科学观念发生根本的变化,科学所研究的既不是纯物理方面,也不是纯生物方面,而是机体本身。生物学研究较大机体,而物理学研究较小机体。

如果我们稍微冷静地考察系统论产生时期的各种哲学流派,就不难发现唯物辩证法是蕴含系统论许多基本观点的富有生命力的哲学。正如贝塔朗菲所指出:“虽然起源有所不同,一般系统理论的原理和辩证唯物主义理论的类同,是显而易见的”^①。

马克思的系统思想及其应用似乎得到了普遍的肯定。例如,美国学者麦奎里和安贝吉认为“马克思确实可以看作是一位早期的系统论者。他的理论工作的主要部分都可以看作是富有成果的现代系统方法研究的先声。”^②波兰学者希通卡指出,“可以把马克思称为社会科学中现代系统方法的始祖”^③。苏联学者勃劳别尔格(L. W. Blauberg)等人认为马克思“是在解决具体认识问题过程中体现系统

① 杜任之主编. 现代西方著名哲学家述评. 北京:生活·读书·新知三联书店, 1980. 482

②③ 麦奎里 D, 安贝吉 T. 马克思和现代系统论. 国外社会科学, 1979. (6)

思想的第一个典范”，而“《资本论》乃是体现系统性原理的第一部科学著作”^①。

对于恩格斯的自然辩证法，现在虽有一些争议，但是他在《反杜林论》、《自然辩证法》等著作中阐述的许多观点同系统论基本观点的惊人的一致，表明系统论的许多基本思想已经以哲学原理的形式存在于自然辩证法之中了。

恩格斯通过对当时自然科学及其历史发展的深湛的研究，认为19世纪的自然科学已由直到18世纪末为止的搜集材料的科学发展到整理材料的科学，因而无论如何也不能逃避辩证的综合。他指出：“辩证法是惟一的、最高度地适合于自然观的这一发展阶段的思维方式”^②。他用唯物辩证法给机械论和目的论以毁灭性的打击，主张必须用辩证法代替形而上学，用辩证决定论代替机械决定论，用辩证因果论代替机械因果论。

他用当时自然科学成果描绘世界的图景，认为“整个自然界形成一个体系，即各种物体相互联系的总体”^③，“整个自然界……都处于永恒的产生和消灭中，处于不断的流动中，处于无休止的运动和变化中”^④。

他科学地解释了自然界的物质结构和运动形式的层次性。在他看来，物体据其质量的相对大小可分为恒星系、太阳系、地面物体、分子、原子和以太粒子；分割的无穷系列中的每一关节点，不是结束这个系列，而是规定质的差别。物质的运动形式可以分为机械的、物理的、化学的、生物的、社会的和精神的；高级运动形式是从低级运动形式发展出来的，它包含着低级运动形式，但不能归结为低级运动形式；为弄清高级运动形式，必须首先弄清低级运动形式，并逐步接近

① 勃劳别尔格等. 马克思著作中系统性原理的应用. 国外社会科学, 1979. (6)

②③④ 恩格斯. 自然辩证法. 北京: 人民出版社, 1971. 190, 54, 16

高级运动形式本身。

恩格斯还明确地强调自然界也有它的时间上的历史,因而“永恒的自然规律也愈来愈变成历史的规律”^①。

特别值得指出的是,恩格斯认为“世界不是一成不变的事物的集合体,而是过程的集合体”^②,而马克思认为“并存性本身不过是继起性的结果”^③。

由上可知,恩格斯的许多论述至今依然放射出灿烂的光辉。只要对唯物辩证法(即社会辩证法、自然辩证法和思维辩证法的有机统一)不抱任何偏见,就不难看出系统论的许多基本观点与唯物辩证法的一致性。

实际上,我们在上面所述的认为系统论从哲学辩证法中吸取了丰富营养的观点,在系统论的先驱、一般系统理论的创始人贝塔朗菲那里得到了有力的佐证。我们知道,对贝塔朗菲的哲学世界观问题,尚须进行深入细致的研究才能做出中肯的评价。据他自述,他早期受过维也纳学派逻辑实证主义的影响,然而他对德国神秘主义、施本格勒(Oswald Spengler, 1880—1936)的历史相对主义和艺术史的兴趣以及类似的非正统态度,使得他未能成为好的实证主义者。不仅如此,后来他实际上抛弃了逻辑实证主义、经验主义和物理主义等时髦哲学,并试图建立系统哲学。他所推崇的哲学家是从赫拉克利特、黑格尔到马克思的辩证哲学家。他通过对哲学史的深入研究吸取了从古到今许多辩证哲学家的合理思想。当然,我们还没有充分的资料来说明贝塔朗菲在创立一般系统理论时在多大程度上吸取了唯物辩证法观点。但是,他在阐述系统思想在哲学上的发展时曾经指出:

① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 216

② 马克思恩格斯选集(第四卷). 北京:人民出版社,1966. 224

③ 马克思. 资本论(第二卷). 北京:人民出版社,1964. 94

“黑格尔和马克思强调思维以及思维所产生的世界的辩证结构：任何命题都不能完全解释实在，而只是在正题－反题－合题的辩证过程中接近对立面的一致。这一论断是深刻的。”^①

“俄国的辩证唯物主义来源于黑格尔哲学与马克思和恩格斯的经济理论，它的原理被陈述如下：第一，自然界不是分离单元的聚集体，而是一个相互连接、相互作用的有机整体。第二，自然界不是静止不变的，而是在不断地运动和进化。第三，在进化过程中，在自然规律的支配下，在从组织的一个层次到更高层次的转折点上出现飞跃，量的变化转化为质的差异。第四，内部矛盾辩证地为自然现象所固有，以致进化过程呈现为两个对立倾向相斗争的形式。”^②

1.2 系统学与信息产业革命

人们通常从多个方面考察系统学的现实基础。其中，常被提及的有下列几种。第一，从美国人泰勒(Frederick Winslow Taylor, 1856—1915)提倡“科学管理方法”以来，经营管理的科学化被看作是经济发展的一个必要条件，与此相适应，组织理论和行为科学得到了引人注目的发展。第二，近代科学的分化趋势使科学技术分成几千种专业领域，但是现实世界并不像学术世界那样分成多种多样的学科，现实世界是一个整体。因此，为了解决现实生活中的各种问题，就需要对不同学科知识进行综合，需要重视不同学科之间的联系。第三，与科学的分化趋势相对应的是科学的整体化趋势。当科学的分化达到一定程度之后，人们开始认识到科学不是把物理学、化学、

① Bertalanffy L. v. The History and Status of General Systems Theory. In: Klir G. J (ed). *Trends in General Systems Theory*. New York: Wiley, 1972, 22

② Bertalanffy L. v. *Problems of Life*. New York: Wiley, 1952, 198

生物学等各部门学科简单相加的集合体,而是以各种不同学科为组成部分的有机整体。既然科学是一个整体,那么就可以和应该把它当作一个整体来研究,应运而生的是科学学。第四,无论在古代还是在中世纪,科学同技术、生产几乎没有多少直接联系。近代科学虽是学者传统和工匠传统相结合的产物,而且自英国工业革命以来科学、技术和生产的联系开始变得比较密切,但是直到 20 世纪中叶以前,科学同技术的直接联系还不多,同生产的直接联系则更少。从 20 世纪中叶起,这种情况发生了根本性的变化,科学、技术、生产这三者已经不是彼此分立的,或只在个别方面、个别时期发生直接联系的三个领域;科学、技术、生产的一体化趋势造就了一个总体系统即科学-技术-生产系统。上述的几个方面以及其他的有关社会背景都可以看作是系统学的现实基础。但是,从历史上看系统学最重要的现实基础是信息产业革命。

信息产业革命即所谓第二次产业革命与 18—19 世纪的第一次产业革命有着根本的区别。第一次产业革命起源于工具机的改革,它为人类贡献的是纺织机、蒸汽机和机床。但是,第一次产业革命本质上是一场动力革命。由于瓦特蒸汽机的出现,人力、畜力、风力和水力开始在生产活动中退居次要地位,生产的机械化被视为整个机器时代的主要标志,而当时的机器体系是由工具机、传动机和动力机组成的。在机器时代的末期,随着电气工业的发展,到了 20 世纪 30—40 年代发生了人类历史上从未有过的一场伟大变革。第二次产业革命本质上是一场信息革命。它首先是由测量技术、通信技术和“计算”技术的革命组成,从中出现的是整个信息产业的兴旺,而控制机作为整个机器体系乃至整个生产过程的枢纽出现。如果说第一次产业革命所解放的是人的体力,那么第二次产业革命所解放的是人的脑力;如果说第一次产业革命所造就的是手工劳动的机械化,那么第二次产业革命所造就的是脑力劳动的机械化。于是,生产的机

械化开始让位于生产的自动化,机器时代开始让位于系统时代。

信息产业革命有它的“硬件”、“软件”和“灵魂”。

1.2.1 信息产业革命的“硬件”

我们把在信息产业革命中涌现的一整套崭新的信息技术即搜集、传输和处理信息的新兴产业技术称为信息产业革命的“硬件”。这些“硬件”是信息产业革命的基本支柱与主要标志。

1.2.1.1 通信技术

这里,我们在最广泛的意义上使用“通信”一词,用来表示传递信息的一切活动。从这个意义上看,通信不仅是人类起源的基本条件之一,而且是整个人类社会赖以生存的基本条件之一。人类的通信活动最初靠的是人体的发音器官、视觉器官和听觉器官。随着人类社会的发展,通信技术在通信活动中的作用越来越大,人们在通信活动中越来越依赖于通信技术。这里,所谓通信技术,是指人们用于通信的所有技术方法和手段,主要指各种通信器械技术,如邮政通信、音响技术、电通信、光通信等。

人类最古老的通信工具是大鼓、角笛、烽火等。后来,由于文字的发明,泥板、石板、木板、金属板、纸草、羊皮等物成为通信工具。例如,公元前6世纪,信件已成为庞大的波斯帝国统治者维持其统治的有效手段之一。后来罗马帝国的情形也是如此。在中世纪,已出现了大学信使、肉店信使等。1516年意大利的塔西斯(Franz von Tax-
is, 1450—1517)在罗马皇帝的准许下,在整个帝国内建立了邮政网络。1840年英国人希尔(Rowland Hill, 1795—1879)建议使用国内统一价格的邮票。

通信事业的近代化必须是通信机械化,而通信机械化只能是通信电气化;通信技术的现代化则是通信电子化,它是从通信电气化发展起来的。现代化通信技术包括电报、电话、无线电和电视等。

19 世纪已经出现了有线电报机。最早出现的是电化学生报机。1809 年德国人索梅凌(S. T. v. Sömmering, 1755—1830)首先发明了这种电报机。电报机的实际应用开始于英国的库克(S. W. F. Cook, 1806—1879)。1837 年他在英国曼彻斯特铁路的休斯顿和卡姆敦这两个车站之间设置了电报机。同一年, 美国人莫尔斯(Samuel Finley Breese Morse, 1791—1872)也试制电报机, 1844 年把它设置于华盛顿与巴尔的摩之间。

电话机是美国波士顿大学的贝尔(Alexander Graham Bell, 1847—1922)在 1875 年发明的。当时, 他把现在人们所用的听筒用作话筒兼听筒。1878 年爱迪生(Thomas Alva Edison, 1847—1931)发明话筒, 才把听筒和话筒分开, 从而有力促进了电话事业的发展。

无线电的发明者是意大利人马可尼(Guglielmo Marconi, 1874—1937)。在他以前, 电报机都是有线的。1895 年他利用火花放电器和金属屑检波器, 制作了第一台无线电报机。随后, 美国人德福雷斯特(Lee de Forest, 1873—1961)将无线电和电话结合在一起, 1907 年成功地进行了无线电话的公开实验。

无线电话的出现为无线电广播和无线电收音机的发明开辟了道路。美国物理学家费丁森(R. F. Fedinson, 1866—1932)为用电信号传播人的声音作了长期努力, 1906 年圣诞节前夕首次进行无线电广播获得成功。1916 年美国马可尼公司的萨娄(S. G. Sarlow)建议将无线电用于家庭用具, 1920 年这一建议变成现实。1920 年 11 月 2 日, 美国无线电专家康拉德(Frank Conrad, 1874—1941)为西屋公司在匹兹堡建成第一座商业广播电台——KDKA。加拿大、新西兰、澳大利亚、丹麦(均在 1921 年)、法国(1922 年)、苏联(1922 年)、墨西哥、日本、印度(均在 1925 年)等国相继建成了无线电台。1924 年美国已有近 600 家无线电台。1926 年美国建成世界上第一个全国性无线电广播网——全国广播公司。到了 1930 年无线广播已在全世

界得到普及。就无线电接收机而言,最早出现的是 1925 年的矿石收音机和来复式收音机,1932 年已出现交流收音机,到了 40 年代则出现了能自由收听短波的先进收音机。

随着无线电的广泛应用,电视也得到了发展。电视的发明可追溯到 1843 年。贝寅(Alexander Bain, 1811—1877)提出用扫描方法分解静止画面并依次传送,就可得到传真照片。但是电视出现的真正可能性在 19 世纪 80 年代。霍尔瓦克斯(Wilhelm Hallwachs, 1859—1922)于 1888 年,埃尔斯特(Julius Elster, 1854—1920)和盖特尔(Hans Geitel, 1855—1923)于 1889 年发现光电效应现象,才使人为的光电转变成为可能。最早出现的是采用机械扫描方法的电视。例如,1926 年英国人柏厄德(John Logie Baird, 1888—1946)、1926 年美国贝尔电话公司研究所、1928 年日本分别试验成功。但是机械扫描电视有结构性缺点,其扫描线只有 30—50 条(最高只达 100 条),即只有现用电视的十分之一。因此人们寄希望于电子扫描方式。1921 年美国人赫尔(Albert Wallace Hull, 1880—1966)研制成功磁控管,1923 年美国人兹沃里金(Vladimir Kosma Zworykin, 1889—1982)发明光电摄像管,1927 年美国人拉克布(H. S. Black)取得电子扫描电视系统的专利,1928 年日本人高柳建次郎制成电视接收机。范斯沃斯(Philo Taylor Farnsworth, 1906—1971)于 1930 年,兹沃里金于 1933 年分别用析像管取代光电摄像管。1933 年美国人阿姆斯特朗(Edwin Howard Armstrong, 1890—1954)发明调频技术。1937 年美国人拉塞尔(V. Russell)和修尔德(V. Siurd)发明高频速调管。1938 年兹沃里金又发明正析像管。1939 年美国广播公司在纽约国际博览会上首次用全电子电视播放电视节目。1943 年美国广播公司研制超正析像管。1946 年美国研制新的电子扫描电视。随着电子扫描电视进入实用阶段,机械扫描电视被淘汰了。在这期间,发达国家纷纷进行电视播放实验。最早的是英国(1929

年),接着德国和法国(均为 1935 年)、美国(1936 年)、日本和意大利(均为 1939 年)都作了电视播放实验。第二次世界大战期间被迫一度中断的电视播放事业战后从 1946 年起得到恢复,首先由英国和美国重新开始播放电视节目。与以上所说的黑白电视几乎同时,彩色电视也得到了发展。1928 年英国人柏厄德和 1929 年美国贝尔电话公司最早作了有关实验。战后,1945 年美国哥伦比亚广播系统开始进行播放实验,1951 年起正式播放。随后,彩色电视在全世界得到了广泛发展。

从上可知,从 19 世纪末到 20 世纪 40 年代,通信技术有了划时代的进步。由有线电报到无线电报、由有线电话到无线电话、由无线电话到无线电广播和无线电收音机、再由无线电广播和无线电收音机到黑白电视和彩色电视的发展,尤其在 20 世纪 30—40 年代出现的巨大变革,使人类的通信技术发生了革命性转变。由于通信技术的革命,通信速度变快了,通信距离变长了,通信范围变大了,而且通信的丰富性、真实性和生动性也有了前所未有的进步。

1.2.1.2 “计算”技术

“计算”技术的现代化开始于 20 世纪 40 年代,以电子计算机为主要标志。电子计算机最初是为适应信息处理量的急剧增多而作为一种高速计算机出现的。但是,电子计算机不是单纯的计算机械,而是以“数字处理”的形式处理各种大量信息、数字计算和逻辑运算相结合的自动化的信息处理机器。它能够自动快速地进行大量的数字运算,能够求解复杂的微分方程,能够进行复杂的推理工作。如果说无线电和电视扩大了人的视听能力,那么电子计算机则扩大了人的思维能力,为信息处理带来了一次革命性转变,开辟了一个新时代。信息处理的自动化、网络化和社会化乃是现代社会区别于近代社会的一个重要标志。

人类最古老的计算用具是人自己的两只手和十个手指。人类所

发明的最古老的计算工具是算盘和计算尺,前者为数字型,后者为模拟型,前者非常适于加减运算,后者则非常适于乘除运算。

计算机的近代化是从 17 世纪开始的。最初产生的是利用齿轮的手摇式机械计算机,后来出现了电动台式计算机。1614 年耐普尔(John Naper, 1550—1617)发明了乘法器,1623 年法国人席卡格(Wilhelm Schickarg, 1592—1635)发明了由加法器、乘法器和能记录中间结果的装置组成的机械式计算机。1623 年法国人帕斯卡(Blaise Pascal, 1623—1662)发明了加法机。1671 年德国人莱布尼茨设计了能进行加减乘除四则运算的计算机,并于 1694 年研制成功,但运行情况并不理想。那以后,也有不少人为制造更好的计算机作过研究和实验。其中最有名的是英国人巴贝奇(Charles Babbage, 1791—1871),他于 1822 年设计了差分机,是专供计算多项式的加法机。1833 年他构思出分析机,该机的结构十分接近于现在的电子计算机。分析机有四个基本部件,即“存贮库”、“运算室”、运算室和存贮库之间传送数字的装置、送入和取出数据的机构。但是,巴贝奇所采用的全是齿轮、齿条、曲柄等机械零件,所以未能成功。

19 世纪末,随着电力技术和继电元件的发展,出现了机电式计算机。美国人霍勒里斯(Herman Hollerith, 1860—1929)于 1884 年用电动机代替人力,制成第一台用电机提供动力的计算机。1890 年他用电磁元件取代部分机械元件,研制出第一台机电式计算机。从 20 世纪 20 年代起计算机研制工作取得了迅速发展。美国的布什(Vannevar Bush, 1890—1974)等人 1925 年研制出大型模拟计算机。他们于 1935 年设计并于 1942 年制造的第二台计算机可以快速求解常微分方程,在第二次世界大战期间用于计算炮击表。1939 年德国人褚兹(Konrad Zuse, 1910—1995)用继电器取代部分机械元件,制成了 Z2 计算机。1941 年他又制成 Z3 计算机,全部使用继电元件,而且是第一台真正的可编程通用自动计算机。40 年代许多国家都

研制出全继电元件的机电式计算机。其中很有名的是艾肯(Howard Hathaway Aiken, 1900—1973)等人于 1944 年研制的自动序列受控计算机即 Mark - I。它也属于机电式计算机,由电力控制的机械元件进行基本运算,其中的典型零件是普通的电话继电器,共有三千个左右。它按照程序员编制的一系列指令自动进行运算。

上述的各种计算机虽然为电子计算机的产生开辟了道路,但是“计算”技术的现代化还是从 1945 年研制成功并于 1946 年投入使用的第一台电子计算机开始的。美国宾夕法尼亚大学莫尔电工系埃科特(John Presper Eckert, 1919—1995)和物理系毛克利(John William Mauchly, 1907—1980)研制成功了 ENIAC(电子数值积分与自动计算机)。这在当时是为了战争的需要。当时,美军为计算炮击表动用了一台布什模拟计算机和 100 名女助手,但计算结果未能令人满意。于是,美军和宾夕法尼亚大学决定合作研制用来计算弹道的高速计算机。这样研制出来的 ENIAC 采用 18000 个电子管取代继电器和其他半机械式装置。由于用电子元件和电子线路进行逻辑运算,使运算速度比最好的机电式计算机快 1000 倍,可靠性也大大提高。这台计算机的主要缺点是程序设计十分复杂,程序变换仍然靠人工来连通相应线路。为克服这一缺点,冯·诺伊曼(Johann Ludwig von Neumann, 1903—1957)于 1945 年建议采用“程序内存”方式,使存储器不仅存储数据而且存储程序,从而使计算机能自动地从一个程序指令转入另一个程序指令。1945 年,在 ENIAC 正式运行前,莫尔小组着手设计和制造这种程序内存计算机——EDVAC(离散变量电子自动计算机)。该机于 1950 年制成,1952 年投入使用。几乎同时,英国剑桥大学数学实验室于 1949 年研制出世界上最早的程序内存计算机——EDSAC(电子延迟存储自动计算机)。美国最早的程序内存计算机——SEAC 于 1950 年投入运行。

冯·诺伊曼机即程序内存计算机出现之后,电子计算机的发展

非常迅猛。在短短的几十年内,电子计算机已经经历了多次的更新换代。20 世纪 40 年代中期至 50 年代中期的是第一代电子计算机即电子管计算机;50 年代后期至 60 年代中期的是第二代电子计算机即分立元件晶体管计算机;60 年代中期至 70 年代初期的是第三代电子计算机即集成电路计算机;70 年代起,各国都在研制第四代计算机即大规模集成电路计算机;到 70 年代末,一些发达国家已开始研制第五代电子计算机,即智能化的光导计算机和超导计算机等。

1.2.1.3 测量技术

通信技术所解决的是信息传输问题,电子计算机所解决的是信息加工问题,而测量技术所要解决的是信息搜集问题。人们获取信息,首先是通过观察和测量。这里的所谓测量,是指用一些仪器和仪表从量的方面规定客观对象的过程。显然,测量是人们搜集信息的一种重要手段。例如,用天平称物体重量,用温度计测量物体温度,用血压计测量人体血压,都属于测量。测量技术的重要性在于人们通过测量仪器和仪表可以获取无法直接用人的感官获取的信息。例如,人无法直接感觉到 X 射线有波动性,但通过衍射实验却能知道这一点。并且,利用 X 射线的波动性,通过测量,还可以知道物质的晶体结构。所以,各行各业都离不开测量仪器和仪表。例如,在电的研究和应用中要使用各种电气仪表,在航空事业中要使用各种航空仪表,在工厂中要使用各种工业仪表,在科研中要使用各种科学仪表。

作为信息产业革命的一个组成部分,测量技术的革命性进步发生在 20 世纪 30 年代,那就是声纳和雷达的出现。

先看声纳。声纳一词是英文 Sound (Operation) Navigation And Ranging 的缩写 SONAR 的音译,原意为“声音导航(定位)和测距”,指利用水下声能来探测水中目标及其状态的仪器或技术。声纳是根据声波的一系列特点研究出来的。同光波和无线电波相比,声波在水中传播衰减最小,传播距离最远,传播速度可达 1500 米/秒。

声纳系统向水中发射超声波脉冲,通过从水中障碍物反射回来的声波可以确定水中目标的存在与否、位置和特性。这样,声纳广泛用于军事目的和经济活动。例如,利用声纳,可实现海下信息的超远距离传播,可以探测、跟踪和识别各种水下目标,探查海洋资源和海底资源,测绘海底地貌,探测鱼群等。在核潜艇出现之后,各类声纳系统,如舰用声纳、探雷声纳、声制导鱼雷、水声多普勒导航仪等,已成为现代海军不可缺少的军用设备。

再看雷达。雷达一词是英文 Radio Detection And Ranging 的缩写 RADAR 的音译,原义为“无线电探测与测距”,指利用无线电波对目标进行检测与定位的一种电子设备。雷达可发现和定位处于恶劣环境(如地物干扰、雨、霾、雪、云、烟和黑夜)和远距离的目标。雷达一般工作在超短波和微波波段内。雷达主要由发射机、天线、接收机和显示器等组成。按工作状态,可分为脉冲雷达和连续波雷达。当触发发射机的调制器启动脉冲雷达工作时,发射机产生强烈的高频电磁脉冲,通过收发开关馈到天线,由天线集成波束并辐射到空间。当波束遇到某个目标时,回波信号就反射回天线,由天线收集并送入接收机,经检波和放大后,在显示器上显示出来,或送入电子计算机进行处理,来确定目标的距离、方向、高度或景象等。根据发射信号到接收回波信号的时间延迟来判定雷达与目标之间的距离;根据辐射波束的方向来测定目标相对于雷达的方向,通常由天线的方位角和仰角决定目标的方向。

雷达的产生也是长期摸索和研究的结果。1886 年赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894)在验证麦克斯韦(James clerk Maxwell, 1831—1879)理论的实验中证实了电磁波(雷达波束)和光波之间的相似性,尤其是说明了无线电波以光速传播,并且能被金属物体和介电体反射。1904 年德国工程师侯斯美尔(Christian Hülsmeyer, 1881—1957)将电磁波用于障碍物探测器和船舶助航装置。1922 年

短波开始用于无线探测。1925 年美国的博烈特 (Gregory Briet, 1899—1981) 和杜武 (Merle Antony Tuve, 1901—1982) 已使用脉冲雷达测距原理。20 世纪 30 年代, 美、英、法、德等国家研制成功脉冲雷达系统。例如, 1938 年英国人利用电磁波反射原理制成军用雷达 CH- 系统, 主要用于探测敌方飞机的位置和海面舰艇的活动。美国人在制造 SCR-270 防空雷达后, 1939 年又造出用于指挥高射炮射击的 SCR-268 跟踪控制两用雷达。

现代化雷达出现在第二次世界大战期间。大战初期, 防空火力的命中率较低, 这就要求改进原来的雷达, 使之跟踪飞机, 确定炮弹在击中飞机之前在空中所要经历的时间和该时间终了时飞机将要达到的距离。1940 年, 英国的布特 (Henry Albert Howard Boot, 1917—1983) 和兰德尔 (John Turton Randall, 1905—1984)、苏联的阿列克谢耶夫 (Н. Ф. Алексеев) 和马略罗夫 (Д. Е. Маляров) 分别制成环形多腔磁控管。到 1944 年, 磁控管的功率增加二至三个数量级。大功率磁控管和微波技术应用于雷达, 使其性能发生巨大变化。一方面, 雷达的探测距离大大增加, 测量精度显著提高, 跟踪目标角度误差大幅减少; 另一方面, 雷达的结构变紧凑, 体积变小。战后, 雷达的功率提高了一个数量级。现代化雷达系统已成为不可缺少的军事设备, 而且还广泛用于气象、天文、导航、测距、测方位、遥感等民用部门。

可见, 声纳和雷达的出现大大扩展了人眼的观测能力, 使人们的信息搜集能力取得了划时代的进步。测量技术的现代化也是现代社会区别于近代社会的重要标志之一。

1.2.2 信息产业革命的“软件”

信息产业与其他产业相比有一些明显特点。现将其主要特点简述如下。

第一,在其他产业领域,人们主要关心的是物质(材料)和能量(动力),但是在信息产业领域人们主要关心的是信息。当然,任何一种产业都需要处理物质、能量与信息。但是,其他产业之所以关心信息,是因为物质和能量的处理不能没有信息,而信息产业之所以关心物质和能量,是因为信息的获取、传输和加工不能没有作为信息载体的物质和能量。值得指出的是,在信息产业革命中,信息产业第一次作为一种独立的产业领域确立了它在整个产业系统中的地位。

第二,在其他产业领域,人们可以只关心单个的机器或机器零件,但是在信息产业中,人们所处理的不可能是单个物件,而必须是一个完整的系统。即是说,在信息产业中必须同时考虑信息的输入、传输和输出,或者信息的输出、传输和输入。在测量仪器、通信器械和电子计算机中情况就是如此。例如,在雷达中,电磁波的发射、传输和接收构成一个系统;在电视中,摄像、播放和显像构成一个系统;在电子计算机中,数据的输入、变换和输出也构成一个系统。不仅如此,信息搜集系统、信息传输系统和信息加工系统相结合而构成整个信息产业技术系统。因此,对于信息产业来说,“系统”是一个内在于其中的必不可少的概念。

第三,在其他产业领域,人们所关心的是如何用机器来解放人的体力,取代人的体力劳动,开辟人的体力劳动器官所无法或难以实现的产业领域,但是在信息产业领域,人们所关心的是如何用机器来解放人的脑力,取代人的简单脑力劳动,开辟人的脑力劳动器官所无法或难以实现的产业领域。例如,动物和人之所以有自调节能力,是由于有大脑和神经系统。生产系统如果有“大脑”和“神经系统”,也能实现自调节。信息产业要向整个生产系统提供的不是其“骨骼”、“肌肉”或“脂肪”,而是其“大脑”和“神经系统”,那就是控制机和管理信息系统。这样,依靠信息产业的产品,生产的机械

化可以向生产的自动化过渡。人工智能的发展正在使这一过渡成为现实。

由信息产业的上述特点可知,虽然前面所述的现代化测量技术、通信技术和“计算”技术是信息产业革命的技术基础和物质基础,但是信息产业革命光靠这些“硬件”是不够的,它必须有能够使这些“硬件”有效工作的“软件”。这里,我们把与信息处理和传输有关的各种理论和方法统称为信息产业革命的“软件”,其中包括信息论、控制论、运筹学与系统工程以及一般系统理论。实际上,这些理论和方法以及在其基础上发展起来的整个系统科学乃是信息产业本身的重要“软件”。

1.2.2.1 信息论

为提高信息传输的效能和保持传输信息的完整性,需要一种用数学方法研究信息的计量、传输、变换和储存的理论。应运而生的是1948年香农(Claude Elwood Shannon, 1916—2001)的信息论。

对通信的研究可以追溯到费马(Pierre de Fermat, 1601—1665)、惠更斯(Christiaan Huygens, 1629—1695)和莱布尼茨关于视觉形象传播问题的光学研究。波尔茨曼(Ludwig Eduard Boltzmann, 1844—1906)和吉布斯(Josiah Willard Gibbs, 1839—1903)的统计力学为信息论的创立提供了方法论基础。到了20世纪20年代,奈奎斯特(Harry Nyquist, 1889—1976)和哈特莱(Ralph Vinton Lyon Hartley, 1888—1970)最早研究了通信系统的传输效率问题。

奈奎斯特于1924年认为电信信号的传输速率与信道频带宽度之间存在着比例关系,进而把通信速度表示为

$$V = I \log N \quad (1.1)$$

其中, V 为通信速度, N 为电信信号的符号种类数, I 为单位时间内传输的符号数。

1928年,哈特莱首次明确规定消息与信息的区别,认为消息是

代码、符号,是信息的载体,具有多种形式,如语言、文字、图像等,而信息是指包含在各种具体消息中的抽象量。他把通信看成发信者选择某些符号(如英语的 26 个字母和空白),编成一个符号串,逐步传输给受信者的过程。他把信息量定义为

$$H = n \log N \quad (1.2)$$

其中, H 为通信文信息量, N 为符号种类数, n 为符号串数。这里他假定每次都独立选择符号,并且每个符号被选择的几率相等。

40 年代,苏联人柯尔莫果洛夫(Andrei Nikolaevich Kolmogorov, 1903—1987)、美国人费舍尔(Ronald Aylmer Fisher, 1890—1962)和维纳关于信息问题的研究也对信息论的产生和发展起了重要作用。但是,提出较完整的信息论体系的还是香农。

一、通信系统模型

香农认为,通信系统一般由五个基本部分构成,如图 1—1 所示。其中各部分可解释如下。

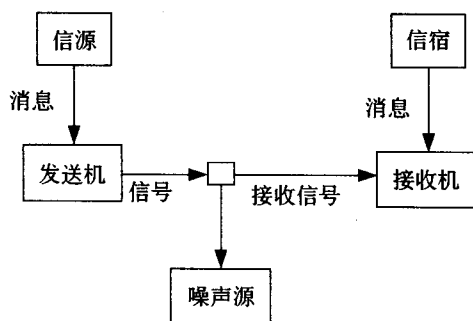


图 1—1 广义通信系统示意图

信源:信源是消息的来源。它产生有待传输给接收端的消息或消息序列。信源可以是人、机器、自然物或社会集团。信源通常以某种符号(文字、图像等)或某种信号(语言、电磁波信号等)发出消息。消息有多种类型,例如,电报中的字母序列;电话中的时间函数 $f(t)$;

黑白电视中的时间及其他变量的函数,如摄像管极板上某点 (x, y) 在 t 时刻的光强 $f(x, y, t)$;二个或更多个时间函数,如立体声响传输需要三个时间函数;几个多变量的函数,如在彩色电视中消息由三个三维连续函数 $f(x, y, t), g(x, y, t), h(x, y, t)$ 组成;以上各种情况的组合,如在电视中配有声音信道。

发送机:其基本功能是编码,将来自信源的消息转换成可在信道上传输的信号形式,如声音信号、电信号、光信号等。例如,在电话中,将声波变成相应的电流;在电报中,将电文变成点、划、间隔序列;在无线电发射器中,把声波变成电信号,又把电信号调制成高频信号,以电磁波的形式发射出去。

信道:它是发送机和接收机之间用以传输信号的媒质或通道。信道可以是有线信道,如导线、同轴电缆、光纤维等,也可以是无线通道,如自由空间、电离层等。信号还可以通过空气、水或固体介质以机械方式传输。信道通常既有信息传输功能,亦有信息贮存功能。在信息传输过程中,信号常被噪声所干扰,所以进入接收机的接收信号通常含有噪声。噪声可能来自系统内部,也可能来自系统外部。

接收机:与发送机相反,接收机的功能是译码。译码是编码的反变换。译码过程把信号翻译成消息,即把信号翻译成文字、图像等。通常,信号只有通过译码,才能为信宿(如收信号人)所理解。

信宿:它是接收消息的人或物,如报告会上的听众,剧场中的观众,收音机或电视接收机等。

香农的通信系统模型是为了研究和处理“通信”问题提出来的。但是它可以推广到“非通信”系统。实际上,在所有信息系统中,都可采用香农模型。例如,在信息产业革命中涌现出来的测量技术(雷达、声纳)和“计算”技术(电子计算机)都可用香农模型来研究其中的信息过程。

二、信息熵与信息量

香农认为:通信的基本问题是在通信的一端精确地或近似地复现另一端所挑选的消息。就通信工程而言,完全可以排除消息的意义即语义问题,集中考虑消息形式(如信号波形)的复原问题。只要能复原消息形式,也就能复原消息的内容。这样,他从形式方面研究了信息度量问题。

假设有一个作为离散信源的随机事件集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 相应的概率为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 即事件 x_i 出现的概率为 p_i 。问题是如何找出一个测度,用它来表示从这个信源中选择某一特定事件的可能性大小,或者某一选择结果所具有的不确定性。香农用 $H(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 表示这个测度,并限定它有下列性质:

(1) H 对 p_i 应当是连续函数。

(2) 如果所有的 p_i 相等,即 $P_i = 1/n$, 则 H 是 n 的单调增函数。即对于等概率事件,当可能事件越多时,选择可能性或不确定性就越大。

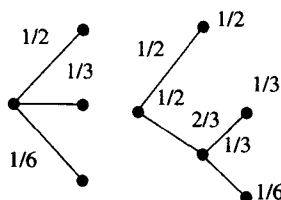


图 1—2 可能性
选择的分解

(3) 如果选择分为相继的两步,那么原先的 H 将等于各个 H 值的加权和。可用图 1—2 说明如下: 图中, 出现事件 x_1, x_2, x_3 的概率分别为 $p_1 = 1/2$, $p_2 = 1/3$, $p_3 = 1/6$ 。

左图为不分步选择的情况,右图为分步选择的情况。从最后结果看,分步与否并不影响这个事件集的不确定性。即要求 H

满足

$$H\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{6}\right) = H\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2}H\left(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}\right)$$

其中系数 $\frac{1}{2}$ 为加权因子。

香农证明,惟一满足上述三个条件的 H 具有下列形式:

$$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (1.3)$$

其中 K 是正常数。这时, H 就被看作是“信息、选择和不确定性的度量”,称为概率集 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 的熵。

量 H 也就是通常所说的信息熵或信源熵。它表示随机事件集 X 整体的熵,即表示信源整体的平均不确定程度。一个信源不管它是否发出符号,只要这些符号满足上述三个条件,就有其 H 值。另一方面,可从信宿角度上考察信宿对信源不确定性的消除,即信宿在接收消息后消除了多少不确定性。这个量通常用 $I(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 表示,称为消息的信息量。如果信宿收到信源的符号后,消除了对这个符号的全部不确定性,那么信源的信息熵与信宿收到的信息量完全相等。通常,信息量可用信宿收到消息之前对某个事件的不确定性与收到消息之后的不确定性之差来表示。

三、编码理论

香农在对信息熵、信息量、信息传输率、信道容量、信道类型进行深入研究的基础上,提出了编码理论。他从理论上阐明,如何编码才能提高通信的有效性和可靠性。

第一编码定理:如果用 M —元码符号表对离散无记忆信源 X 编码,那么,每个信源符号对应的码字的平均长度(平均码元数) $\bar{l}_K/K$ 将以信源熵 $H_M(X)$ 为下界; K 越大, $\bar{l}_K/K$ 越接近于 $H_M(X)$,但编码过程变得越复杂。另一方面,只要平均码字长度满足

$$H_M(X) \leq \frac{\bar{l}_K}{K} < H_M(X) + 1 \quad (1.4)$$

就总可以找到一种无失真的编码;反之,若 $\bar{l}_K/K$ 小于 $H_M(X)$,则编码必定有失真。

该定理通过说明信源熵与码字长度之间的关系,指出了可以为离散无记忆平稳信源找出有效编码方法,来提高信息传输效率,又不

会引起信息失真。

第二编码定理:如果信道是离散无记忆平稳型,且其容量为 C ,那么,只要信息传输率 $R < C$,就总可以找到一种编码方法,使在输入序列长度 K 足够大时,译码的差错概率 p_e 任意接近于零;反之,当 $R > C$ 时,则不管采用怎样的编码方法,它的差错概率 p_e 也就必然大于零,而且随着 $K \rightarrow \infty$,必有 $p_e \rightarrow 1$ 。

该定理表明,当信息传输率 R 任意接近信道容量 C 时,通过适当的编码方法(表现为 K 足够大),就可能使译码差错率 p_e 任意小;但是如果 R 大于 C ,则不可能有使译码差错率任意小的编码方法,而且码的长度 K 越长,译码差错率就越高。

第三编码定理:如果有一离散无记忆平稳信源,其信息率—失真函数为 $R(D)$,那么,只要满足信息传输率 $R > R(D)$,当信源序列长度 K 足够大时,就存在一种编码方法,使其译码失真小于或等于 $D + \epsilon$, ϵ 为任意小的正数;反之,如果 $R < R(D)$,则无论什么样的编码方法,都不可能使译码的失真小于或等于 $D + \epsilon$ 。

该定理表明,在限定失真为 D 的情况下,信源的信息率与译码的失真度之间有一定的对应关系。这里,信息率—失真函数 $R(D)$ 表示在失真限度以下对于给定信源所要求的最小的信息传输率。

1.2.2.2 控制论

当香农创立信息论的时候,维纳等人创立了另一门新学科,维纳称之为控制论(cybernetics)。这是从希腊字 κυβερνη'τηρ(掌舵人)变来的单词。在希腊文中,κυβερνη'τική(控制论)一词并不是新词。它在柏拉图的著作中多次出现,原意为驾船术、操舵术,还用来表示管理人的艺术。1834 年法国物理学家安培(André-Marie Ampère, 1775—1836)在研究科学分类时,把管理国家的科学叫作控制论。在这个意义下,控制论一词编入 19 世纪许多著名词典中。安培把控制论和“民权的科学”、外交术、“政权论”都列为政治科学,

而且控制论和政权论构成了他的政治一词的本义。1868年麦克斯韦发表一篇关于调速器即一种反馈机构的文章,而拉丁语调速器(governor)一词是从 κυβερνήτης 讹误引伸而来的。维纳正是为了纪念麦克斯韦的这篇文章选用了控制论一词。1943年维纳与罗森卜吕斯(Arturo Rosenblueth, 1900—1970)、毕格罗(Julian Bigelow, 1914—2003)合作发表《行为、目的和目的论》一文,提出了控制论的基本思想。1948年维纳发表《控制论》一书,宣告了这一新学科的诞生。

维纳把控制论定义为“关于在动物和机器中控制和通讯的科学”。他把通信问题也包括在控制论中。但是,一般来讲,控制论主要关心的是控制,而把通信当作控制的一个必要条件,因为控制是靠信息反馈来进行的。这里所说的控制,是指为使某一对象达到一定目标,以该对象当前状态与目标之间差异的信息为基础而选择的,施加于该对象上的各种作用。维纳所追求的控制论,实际上是一般控制理论(General Control Theory),他试图从机器系统、生物系统和社会系统的类比和研究中找出适用于各种不同系统的一些共同的控制原理。他在《控制论》一书中阐述了下列几个问题。

一、控制论时间

牛顿(Isaac Newton, 1643—1727)时间是可逆的。牛顿力学的基本定律不因时间变量 t 变为 $-t$ 而改变。例如,它所描述的天体运动具有这种时间反演不变性。但是,如同柏格森(Henri Bergson, 1859—1941)所指出,生物学的时间与物理学的时间不同;后者是可逆的,其中没有什么新东西出现,但前者是不可逆的,其中总是发生新的事物。

那么,控制论时间应当属于哪一种呢?答案是控制论时间属于柏格森时间。例如,在自动机中,输入—输出关系形成一个时间序列,并且具有确定的过去—未来的次序。因此,自动机跟生命体一

样,都存在于柏格森时间中。但是对一个灵敏自动机来说,不能满足于对一次输入做出满意的动作,而是对全部输入做出满意的动作。也就是说,必须对一类统计上预期要收到的输入做出统计上令人满意的动作。因此,灵敏自动机的理论应该是统计理论。这样,维纳强调了统计的、进化的观点在控制论中的重要性。

二、熵与信息

在控制论中,控制是靠信息来进行的。维纳用统计力学中的熵概念研究了信息与信息量。他认为:在统计力学中,熵表示相空间区域的几率测度的对数。对于由大量粒子构成的系统和可识别的状态来说,如果系统中粒子状态的分布使系统的熵不为最大,那么系统的变化总是会使熵增大。而信息损失的过程与熵增加的过程十分相似。当原先彼此分开的各个几率区域相互融合的时候,就发生信息损失过程。例如,当我们把某个变量的分布用该变量元函数的分布来代替,而该函数对该变量的不同值取相同值时,或者,当我们允许一个多变量函数中的某个变量任意地在其自然变域上变动时,就会损失信息。对消息作任何操作都不能使平均信息量增加,反过来,对一暧昧事件的仔细整理会使平均信息量增加,而不会损失信息。可见,平均信息量具有熵的各种性质。

根据这样的理解,维纳指出:“信息量的概念非常自然地隶属于统计力学的一个古典概念——熵。正如一个系统中的信息量是它的组织化程度的度量,一个系统的熵就是它的无组织程度的度量;这一个正好是那一个的负数。”^①

三、时间序列

在孤立系统中,熵总是要增大,最后达到平衡。但是在控制系统

^① 维纳. 控制论. 北京:科学出版社,1985. 11. 这些观点是否正确,我将在本书第六章进行深入讨论。

中,可以发生熵减小、组织化程度增大的现象。古典统计力学不能直接用来揭示控制系统的特性。这就促使维纳研究了时间序列的统计理论。

他运用各态历经定理来研究处在统计平衡的时间序列问题,得出了这样的结果:在一定条件下,处在统计平衡的时间序列的时间平均等于其相平均。这样,根据一统计平衡系综中某一时间序列的过去数据,就能以误差几率为零的精度计算出该统计平衡系综的整个统计参数集。这就是说,由过去出发,从统计上推知未来,预测未来,是完全可行的。由此产生的就是著名的预测和滤波理论。滤波的目的在于尽可能恢复被噪声干扰了的信息流,实际上也就是要预测被噪声干扰了的时间序列。从数学上说,所谓预测,就是从—个时间序列的过去的的数据估算整个系综的统计参数。估算的结果是统计参数的平均值,与实际参数值有一定误差。维纳建立最优预测的数学公式,并提出怎样才能使预测误差为最小。

四、反馈

控制论的一个研究重点是信息反馈控制,见图 1—3。反馈分为正反馈和负反馈。前者是指重新进入系统的部分输出信号与原来的输入信号取同号,使得输入信号增大。后者是指来自目标的信号被用来限制输入,使得输出值不断趋近并最终达到目标值(这里所说的

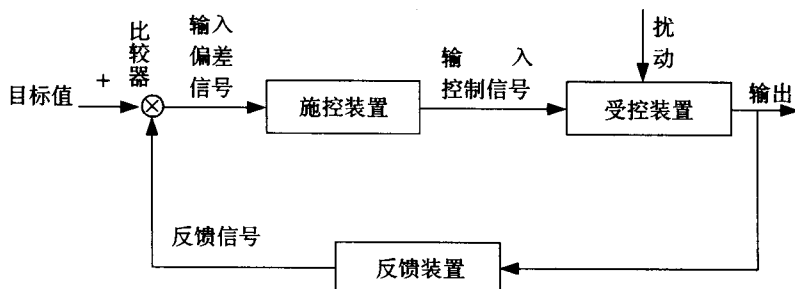


图 1—3 反馈控制系统

只是正负反馈的常用形式,对其他形式的正负反馈请参看本书 4.3.2)。在控制论看来,控制的机制在于负反馈。

维纳在创立控制论的时候,不仅讨论了上述的(以及其他的)理论问题,还用自己的基本理论观点讨论了各种自动控制技术问题(包括电子计算机、自动火炮、通信机器等)、生命体的调节机制、心理现象和社会现象等,不仅为当时的信息产业革命提供了有力的理论武器,而且为控制论的进一步发展奠定了概念基础。例如,后来建立起来的工程控制论、生物控制论、经济控制论和社会控制论都是在维纳的富有创造性的意见中吸取了营养。

1.2.2.3 系统工程学与运筹学

信息论和控制论所研究的是信息过程,而信息过程只是整个系统内部过程的一个侧面。现实的系统不仅含有信息过程,而且含有物质过程和能量过程。如在生产系统中,需要总括地考虑物流、能流、信息流、人流等。即使在信息产业中不能不考虑物质和能量,如电子元件、电磁波等。所以,为了全面地认识和处理各种现实系统问题,光是控制论和信息论是不够的,还需要有更广泛的理论,用来从物质、能量、信息三个方面综合考虑整个系统,尤其在规划、设计、开发、构成和运用各种复杂大系统时更要这样。系统工程学和运筹学应运而生。

在系统工程领域,发展最早的是随机服务系统工程,起源于电话工程研究。从 1909 年起,丹麦哥本哈根电话公司工程师厄朗(Agner Krarup Erlang, 1878—1929)等人取得了这方面的最早成果。1930 年美国广播公司在发展电视广播的过程中使用了“系统观点”。1940 年美国贝尔电话公司将系统概念应用于开发自动电话交换机,并率先使用“系统工程”一词。

虽然系统工程起源于信息产业领域,但是由于历史的原因,系统工程却是在第二次世界大战中取得了广泛发展。在战争中,又出

现了与系统工程意义相近的另一个概念即“运筹学”^①。就系统工程与运筹学的早期情况而言,系统工程强调系统概念、系统思想和系统方法,而运筹学为这些概念、思想和方法的应用提供了数学工具。

在古代战争史上,达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452—1519)和伽利略等人曾用科学方法研究过战争行为。1782年苏格兰的克勒克(J. Clerk)发表关于海军战术的论文,研究如何使己方船只的暴露为最小,而对敌方船只的火力攻击效果为最大的问题。1811年普鲁士的冯·莱斯维提出过对策模拟方法。

在第一次世界大战期间,英国数学家、工程师兰切斯特(Frederick William Lanchester, 1868—1946)对空战进行数学分析,提出作战格局的简化数学模型,并对战局的概率分布进行过预测。发明家爱迪生用博弈方法提出了商船回避潜艇攻击的最优航行方法。美国生理学家希尔(Archibald Vivian Hill, 1886—1977)研究过高射炮的实效问题,并领导了英国国防部的防空实验小组。

运筹学的真正形成与发展始于第二次世界大战期间。战争初期,盟国在军事力量上处于劣势,为了对付德国的军事优势,以英美两国为中心组织一些科学家开发一套科学的作战方法。当时,盟国的基本要求是从总体上考虑敌我双方现有的和后备的装备与人员情况,把整个雷达系统、防空系统、护航系统、后勤系统、军事指挥系统统一协调起来,以达到最佳的效率,取得战争的胜利。为了实现这个目标,需要优化战略部署,而战略部署的优化需要开发和运用一系列数学工具。

^① 王雨田. 控制论、信息论、系统科学与哲学. 北京: 中国人民大学出版社, 1986. 394—403. 见: Origins of Operation Research, http://www.more.org/meetings/combat-analyst/ca_pres/Garrambone.pdf

例如,看英国的空防系统问题。第二次世界大战前夕,英国已研制出雷达。1938年英国在东部沿海地区已开始设置一些雷达站作为空防的第一道防线。英国在1938年7月举行过一次重要的防空演习中,发现从不同的雷达站接收到的一些信息有时相互矛盾。而且,为了建立有效的空防系统,还必须协调雷达系统与其他防空部门的关系。因此,演习一结束,英国立即着手研究雷达系统运用方案,对雷达网和皇家观察队所提供信息的协调问题、战斗机编队对付轰炸机编队的控制技术问题以及单一战斗机对付单一轰炸机的控制技术等问题进行了多方面的深入研究。1939年夏天,英国举行了战前的最后一次防空演习,演习表明防空警戒和控制系统的运用有很大改进。当时担任英国空军防空科学调查委员会主席的物理学家提扎德(Henry Thomas Tizard, 1885—1959)还组织一些科学家研究运用雷达指挥空战,并对有关的操作提出建议。当时的作战研究部主任劳厄(Albert Percival Rowe, 1898—1976)把这些运用数学方法对管理活动进行统筹规划、做出决策的工作称为运筹学(Operational Research)。1940年成立以著名物理学家布莱克特(Patrik Maynard Stuart Blackett, 1897—1974)为首的运筹学小组,在英国防空系统与战斗机的部署与控制、一些战役的估计与决策等问题上做出了重要贡献。由于这些方面的突出贡献,布莱克特被誉为英国“运筹学”之父。

再看目标的选择问题。第二次世界大战初期,英国处于战略防御阶段,英国本土受到德国空军的频繁袭击,海上受到德国飞机与潜水艇的封锁。在这种情况下,为了变战略防御为战略进攻,必须从战争全局出发分析与处理有关的各种战役、战斗与后备系统。例如,当时德国空军对英国海军的巨大威胁,迫使英国一方面为海上运输船舰配备高射炮,另一方面派遣护航舰保护这些运输船舰。最初,英军作战目标被定为如遇敌机轰炸运输船舰,就击毁敌机。在这一目标

下,英军货运效率很低,货船损失很重。后来,将作战目标由击毁敌机改为击溃敌机,才使货运效率大大提高。实际上,对于一个要素众多、目标多样的大系统来说,目标选择的优化问题十分复杂,需要对系统整体与有关要素进行定量分析与研究。当时,英国战斗机的数量少,因此如何提高飞机的使用率也是一个重要的问题。以戈登(C. Gordan)博士为首的英国沿海防御运筹小组研究护航飞机的使用情况,找出护航飞机使用与维修的合适关系,使海岸司令部出动飞机的架次几乎增加了一倍,对大西洋战役做出了重大贡献。这里运筹学也发挥了重要作用。

从上可知,在第二次世界大战期间,战争的需要促使系统工程和运筹学取得长足的发展。当时,居重要地位的是军事系统工程和军事运筹学。在战争期间和战后美国运筹学发展中,起重要作用的是物理学家莫尔斯(Philip McCord Morse, 1903—1985)^①。1942年他作为美国海军组织的运筹学小组成为美国“赢得战争的一个重要因素”。战后,他与另一位重要运筹学家金博尔(George Elbert Kimball, 1906—1967)一起,总结战争期间研究成果和实践经验,1946年在美国内部发表介绍运筹学的机密文献,1950年公开出版《运筹学方法》(Methods of Operations Research)一书。1952年创立美国运筹学学会并担任首席主席,此后还为运筹学的大学教育、研究和各方面的应用做出了突出贡献。他被誉为美国“运筹学之父”。另一方面,古德(Harry Goode, 1909—1960)与麦考尔(Robert Engel Machol, 1917—1998)撰写的《系统工程学》(Systems Engineering)一书于1957年问世。可以认为,系统工程学与运筹学作为新兴学科从此得到了学界和社会普遍承认。

^① 见: Philip McCord Morse, http://www.informs.org/History/Gallery/Presidents/ORSA/philip_morse_1.htm

战后,系统工程和运筹学除了继续在军事方面得到应用外,还广泛地应用于宇航、生态、人口、社会经济、行政管理等方面。

1.2.2.4 一般系统理论

一般系统理论的创始人是奥地利生物学家贝塔朗菲。与信息论、控制论、系统工程学/运筹学不同,一般系统理论并不是为了解决信息产业革命中的特定技术问题而提出来的。贝塔朗菲提出一般系统理论的直接背景有三个方面:其一是他为了解决生物学领域机械论与活力论之争而提出的机体论和机体生物学,其二是系统论科学思想在哲学和科学领域的兴起,其三是科学统一趋势的明朗化。贝塔朗菲认为,一般系统理论要研究各种系统的一般方面、一致性和同型性。

这样,一般系统理论虽然没有去分析和研究信息产业革命初期的具体的技术问题,但是却为解决信息产业革命所提出的各种技术问题和理论问题提供了一种更广泛的一般理论和方法。随着信息产业的发展,这一点已被广大人们所理解。现在,系统科学中的各种理论、各种流派,从某种意义上说,都是在贝塔朗菲一般系统理论基础上发展起来的,或者从中吸取了有益的理论观点。

一般系统理论的产生可以追溯到 20 世纪 20 年代。当时,贝塔朗菲批判生物学领域的机械论和活力论,倡导机体论,并创立了机体系统理论即机体生物学。1937 年贝塔朗菲在访问美国期间,在芝加哥大学莫里斯(Charles William Morris, 1901—1979)主持的哲学研讨班上首次使用“一般系统理论”一词并明确提出一般系统理论原理。他指出:“存在着适用于一般化系统或其子系统的模型、原理和规律,而不论其具体种类、组成要素的性质和它们之间的关系或‘力’的情况如何。我们提出一门被称为一般系统理论的新学科。一般系统理论是逻辑—数学的领域,它的任务乃是阐述和导出总的适用于

‘系统’的一般原理。”^①1945年贝塔朗菲发表了一般系统理论的创立宣言——“关于一般系统理论”。从人类科学发展史和思想史上看，这篇论文的意义不亚于甚至在某些方面超过普朗克(Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858—1947)的量子论、爱因斯坦的相对论、海森堡等人的量子力学和维纳的控制论。但是不幸的是，这篇具有历史意义的论文被毁于战火，直到1949年重新刊载于《普通生物学》杂志以前，几乎无人知道。

现将“关于一般系统理论”^②一文的基本内容概括如下：

一、一般系统理论的目的、任务和意义

贝塔朗菲在此文中指出：

“整体、组织和动态观点的原理出现在与经典的机械论观点相对立的量子力学中，出现在与分析—相加的和机器理论的观点相对立的、作者称之为‘机体的’生理学发展中，出现在与联想心理学相对立的心理学格式塔理论中，还出现在社会学中与经典观点相对立的现代观点中。……最普遍的科学原理作为同一物出现了，不管所涉及的是无生命自然界、有机体，还是精神过程或社会过程。这种一体化是怎样发生的呢？”

“我们需要用被我们称为‘一般系统理论’的新科学领域来回答这个问题。它是一个逻辑—数学领域，它的任务是表述和推导适用于‘系统’的一般原理。存在着系统的一般原理，不论其组成要素以及其相互关系或‘力’的种类如何。在所有领域中所涉及的是关于系统的科学时，就出现不同领域的规律性在形式上的一致和逻辑上的

① Bertalanffy L. v. The History and Status of General System Theory. In: Klir G. J. *Trends in General Systems Theory*. New York: Wiley, 1972. 26

② Bertalanffy L. v. Zu einer allgemeinen Systemlehre, *Biologia Generalis*, 1949. (19); 见：朴昌根译。“关于一般系统论”，自然科学哲学问题丛刊，1984. (4): 1—8；另见：庞元正、李建华编. 系统论控制论信息论经典文献选编. 北京：求实出版社，1989. 7—21

‘同一’。”

“或许可以说，‘系统’理论在现代科学的动态观点中所起的作用可以与亚里士多德逻辑在古代所起的作用相媲美。……就现代科学而言，在所有领域中发现动态相互作用，则是其基本问题，而它们的一般原理在系统理论中得到表达。”

二、系统概念

贝塔朗菲将系统定义为“由定量测度 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 标征的相互作用的一系列要素 $P_1, P_2, \dots, P_m$ 。在非常简单的情况下，可用下列微分方程组表示一个系统：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ \frac{dQ_2}{dt} &= f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ &\vdots \\ \frac{dQ_n}{dt} &= f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

这里，为了简化起见，他忽略了系统的时空条件，如果考虑系统的时空条件，需要采用偏微分方程形式；同时也忽略了过去事件与当前时间之间可能存在的依赖关系，如果考虑这种关系，就需要用积分微分方程。

但是上述的微分方程组可适用于相当广泛的领域。而且，即使对函数 $f_1, f_2, \dots, f_n$ 的性质以及系统内存在的实际关系毫无所知，也能从上述方程组中推导出某些一般原理。

三、若干系统性质及系统变化的数学描述

贝塔朗菲用方程组

$$\frac{dQ_i}{dt} = f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_3) \quad (1.6)$$

来讨论了系统的若干性质和动态特征。

1. 整体性

设该方程组可展开为泰勒(Brook Taylor, 1685—1731)级数, 得

$$\frac{dQ_i}{dt} = a_{i1}Q_1 + a_{i2}Q_2 + \cdots + a_{in}Q_n + a_{i11}Q_1^2 + \cdots \quad (1.7)$$

这意味着某一要素 Q_i 的变化是从 Q_1 到 Q_n 的所有要素的函数, 而某一要素 Q_i 的变化会导致其他所有要素及整个系统的变化。因此, 系统表现为一个整体, 其中每一要素的变化依赖于所有其他要素。

2. 加和性

令变量 $Q_j (j \neq i)$ 的系数 = 0, 则

$$\frac{dQ_i}{dt} = a_{i1}Q_i + a_{i11}Q_i^2 + \cdots \quad (1.8)$$

这表明每一要素的变化只与它本身有关, 整个系统的变化是各独立要素变化的总和。这种行为可称为物理加和性。数学上的加和性是指整个系统的变化所遵从的方程在形式上与每一个别方程相同。

3. 渐进机械化

如果 Q_i 的系数不是常数, 而是随时间而减少, 例如,

$$\lim_{i \rightarrow \infty} a_{ij} = 0 \quad (1.9)$$

那么, 系统从整体性状态过渡到各要素独立行动的状态。这种现象称为渐进机械化。在渐进机械化过程中, 要素之间的相互作用减弱, 各要素的独立性增强。

4. 渐进集中化

如果要素 Q_i 的系数在所有方程中都很大, 而其余要素的系数都很小, 或者甚至等于零, 那么该系统可简化为(在此只写出线性项):

$$\begin{aligned}
\frac{dQ_1}{dt} &= a_{11}Q_1 + a_{1s}Q_s + \dots \\
\frac{dQ_s}{dt} &= a_{s1}Q_1 + \dots \\
\frac{dQ_n}{dt} &= a_{ns}Q_s + \dots + a_{nn}Q_n + \dots
\end{aligned}
\tag{1.10}$$

这时,要素 Q 称为系统的主导部分,或者说,系统以 Q 为中心。渐进集中化表示随着时间推移逐步形成主导部分。在系统的动态变化中,既有渐进机械化,又有渐进集中化,而渐进集中化意味着渐进个体化。

5. 终极性

设系统的定态解为 Q_i^* , 引进新的变量 Q_i' , 使得

$$Q_i = Q_i^* - Q_i' \tag{1.11}$$

则

$$\frac{dQ_i}{dt} = f[(Q_1^* - Q_1'), (Q_2^* - Q_2'), \dots, (Q_n^* - Q_n')] \tag{1.12}$$

这表明,如果系统达到一个定态,那么其间所发生的变化不仅与现实条件有关,而且与和定态的距离有关。即是说,系统的实际变化依赖于只有将来才能实现的定态。这种动态特性称为终极性。

如果系统从不同的初始条件和通过不同路径(或方式)达到同一终态,就称之为等终极性。如果当前行为由预期目的规定,就称之为真终极性或目的追求性。

6. 等级秩序

如果 Q_i 的每个项是由其要素 Q_{ij} 构成的系统,而且

$$\frac{dQ_{ij}}{dt} = f_{ij}(Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{in}) \tag{1.13}$$

那么,系统的这种构成方式就称为等级秩序。

四、开放系统与封闭系统

贝塔朗菲认为,一个系统如无从外部进入的要素和向外界排出的要素,就是封闭系统;如果一个系统存在着要素的流入和流出,就是开放系统。开放系统理论的重要性在于:以往的物理学和化学几乎只研究在封闭系统中进行的并且达到化学平衡的过程,但是生命系统的特征却在于它们是开放系统,其组成部分处在不断更换即分解与合成之中。

据热力学第二定律,一个封闭系统最后必定达到不依赖于时间的平衡态,各相的相互比例保持不变。但是,一个开放系统(假如满足某些条件)可以达到一个不依赖于时间的定态,在此,系统在各要素的更换中不仅作为一个整体保持不变,而且从其中的各相看来也保持不变。开放系统中的反应流不能达到真平衡,只能达到定态,这种定态可称为流动平衡(Fliessgleichgewicht)即稳态(steady state)。一个封闭系统为了保持不变,既不需要从外界获取能量,也不能从中向外界提供能量。但是一个处于流动平衡的开放系统,可以向外界做功,而为了保持其流动平衡,需要从外界吸收能量。

贝塔朗菲认为,可以用普通的输运方程来研究开放系统。设 Q_i 是方程组中第 i 个要素的测度,如浓度或能量密度,它的变化可表示为

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} = T_i + P_i \quad (1.14)$$

其中, T_i 是在一定空间点中一个体积元内要素 Q_i 的输运速度, P_i 是这些要素在这一点上的产生速度。一般地说,这个系统可有三种不同的解:第一, Q_i 可能无限增大;第二,可能达到不依赖于时间的流动平衡;第三,可能得到周期解。

贝塔朗菲的这些基本观点在他后来的论著中,尤其是在他的代表作《一般系统理论》(1968年)一书中得到了更细致的阐述,并且被应用于物理学、化学、生物学、心理学、社会学、工程技术和管理科学。

信息产业革命的“软件”按理还应当包括当时出现的其他一些系统理论,如屈弗缪勒(Karl Küpfmüller, 1897—1977)的系统理论等。这些“软件”为信息产业的发展提供了理论武器,并且构成为系统科学的“零件”。现在的系统科学包含着上述的各种理论和方法,并且在这些理论和方法的基础上逐步形成一个统一的科学技术领域。尤其是贝塔朗菲所开创的一般系统理论虽然有诸多不足之处,但是却为整个系统科学的理论基础——系统学的形成和发展提供了一系列重要的启示。

1.2.3 信息产业革命的“灵魂”

在信息产业革命中,我们所看到的是,信息产业突飞猛进,信息技术日新月异,各种系统理论和系统方法到处涌现。由于信息产业不同于传统产业,信息技术不同于传统技术,系统理论和方法不同于传统科学理论和方法,信息产业革命的兴起不仅使整个社会面貌发生了根本性的变化,而且使整个人类的思想观念发生了根本性的变化。这一历史进程需要一种新的科学思想,而它本身又是这一历史进程的产物。在此,我们把在信息产业革命中起主导作用的科学思想称为信息产业革命的“灵魂”。从信息产业的特征中可以知道,无论在信息产业革命的“硬件”中,还是在信息产业革命的“软件”中,都渗透着系统思想。而对系统思想的系统表达就是所谓系统论。如前所述,无论从逻辑上看还是从科学思想的历史发展上看,系统论是批判地吸取部分论和整体论的合理内容而产生和发展起来的,但是就其社会基础而言,它又深深地扎根于信息产业革命之中。

就单个人来讲,他的行动总是受着某种思想的支配,但是就整个社会而言,社会现实总是走在社会思想的前面。当人们被卷入信息产业革命的时候,系统思想的火花点燃了他们的激情,从而使他们听到时代的呼唤,看到前进的方向,在信息产业革命中大显身手。但是

对系统思想的科学表达却只能落在信息产业革命的后面。这并不是什么奇怪的事情,而是历史的现实。只有在信息产业充分发展的时候,只有在人们不仅对既有的思想材料而且对信息产业中新出现的各种事态进行冷静思考之后,才有可能使系统思想逐渐成熟起来,使它具有既切合于它自身又切合于社会需要的形式。在这一探索过程中,系统思想不可避免地具有各种不同的表达形式。实际上,至今为止,在如何表达系统思想方面,仍然存在着各种不同的观点。

现在,我们来简单地考察其中的三种观点,即突现主义、结构主义和系统论。

其一,是突现主义。在突现主义看来,整体是由作为其组元的、预先存在的部分的组合中突现的统一体。这个统一体的存在与特性依赖于部分的存在与特性。没有部分就没有整体。例如,一台机器的形成以其各零件的存在为先决条件,一个社会以其各成员的存在为先决条件。

其二,是结构主义。突现主义的出发点是各个部分,与此相反,结构主义的出发点是有结构的整体,即子结构在其中作为部分存在的整体。尽管结构主义者在把结构看作是具体的或抽象的、静态的或动态的、客观的或主观的这些方面互有区别,但是他们都预先假定整体及其结构的存在。在结构主义看来,整体性是结构的定义标志;整体及其结构不能简化为在一个特定整体中所描述的各种关系的全体;真正的突现并不是由部分到整体的转变,而是由原有的结构向新的更复杂结构的动态转变。

其三,是系统论。我们在本章的第一节已经指出,系统论是批判地吸取部分论和整体论的合理内容而产生和发展起来的。实际上,各种系统思想的起源都可以这样来解释。在系统思想的自身发展中,系统论又是在批判地吸取突现主义和结构主义的合理内容的过程中逐步完善、逐步发展起来的。

一方面,突现主义正确地指出了相对于部分而言的整体的突现性,但是它忽略了部分对整体的依赖性。就其现实性而言,整体确实以其部分的存在为自己的存在条件,但是就其历时性而言,部分的存在又是整体的产物。一台机器确是将各个零件装配而成的,但是这些零件又是根据整个机器的设计要求设计和制造出来的。一个社会包含着众多个人,但是这些个人的社会属性又是他们生活在其中的各种社会关系的产物。因此,在研究整体和部分之间关系时,不仅要考虑整体对部分的依赖性,而且要考虑部分对整体的依赖性。

另一方面,结构主义强调结构在整体及其变化中的作用是正确的。但是,就其存在和存在方式而言,任何结构都是各部分的相互关系的总体;没有部分就没有结构。离开部分的结构是抽象的,而不是具体的。就是在结构的变化中,也不能不考虑部分或/和部分之间关系的变化。

因此,在系统论看来,整体和部分之间存在着有机的依赖关系。一方面,部分不能与整体相分离,各部分是整体的构成部分;另一方面,整体是由它的各个部分组成并在各部分的相互依赖中得以存在的总体。从本质上看,整体与部分之间的关系不是一先一后的关系,也不是一者决定另一者的关系,而是相互依赖、相互作用、相互渗透和相互转化的关系。

在作为一个系统的整体(whole,希腊语为 holos)中,作为其部分的部分并不是独立存在的单纯的部分,而是既具有独立性又具有依赖性的整子(holon)。^① 每个整子都具有两种倾向,一是作为整体的部分起作用的、与其他整子相结合而构成整体的一体化倾向,另一是在与整体和其他整子的关系上保持其独立性的自肯定倾向。可以

① 这一概念是匈牙利人柯斯勒(Arthur Koestler, 1905—1983)最早引入的。见: www.agentsmith.com/memento/h/holon.html

说,自肯定倾向是对整子的整体性的动态表达,而一体化倾向是对整子的部分性的动态表达。在一个整体中,当各个整子所具有的这两种倾向相协调时,整体能保持稳定;当自肯定倾向压倒一体化倾向时,整体会迅速瓦解;当一体化倾向吞没自肯定倾向时,整体会经过某种超稳定走向崩溃。

还需要指出的是,在不同层次上,整子和整体都是突现的,是被突现的,又是产生突现的。整体可以在整子基础上突现,而整子亦可以在整体中突现。例如,一台机器是在其零件的有机结合中突现的,而生物体的各器官却是在胚胎发育过程中靠着渐进分化突现出来的。因此,为了正确地理解突现问题,需要考虑整子和整体之间的各种动态关系,需要考虑层次问题,还需要考虑系统进化过程。

以上关于系统论的阐述只是初步的,还需要发展和完善。但是,对信息产业革命“灵魂”的正确表述既不可能是部分论和整体论,也不可能是突现主义和结构主义,而应该是系统论。

1.3 系统学史略

我们正在进入一个新的历史时代即系统时代。在这个新时代,信息产业是占主导地位的产业,系统论是占主导地位的科学思想,而系统科学是占主导地位的科学。

系统科学正在取代物理科学在科学知识体系中的主导地位。这一伟大变革的契机,一是系统论的兴起,二是信息产业的兴起,三是系统科学自身的发展。

如果从贝塔朗非提出“一般系统理论”概念的 1937 年算起,系统科学已经有了 60 多年的历史。在过去的 60 多年里,系统科学以巨人的步伐向前迈进,已从信息产业革命的“软件”发展成为一个庞大的科学技术领域。

下面,我们将按照时间顺序,以系统学为中心,简要地考察系统科学在过去的各个年代所取得的主要成果,虽然不无挂一漏万之嫌,但是从中还是可以了解系统科学发展的基本脉络。

1.3.1 20 世纪 20—30 年代

20 世纪初,普朗克的量子论和爱因斯坦的相对论给机械论以沉重打击,而 20 世纪 20 年代则是机械论在哲学和科学领域遭到惨重失败的年代。玻尔、海森堡等人的量子力学和信息科学萌芽的出现,又是对机械论的致命打击;而胡塞尔(Edmundo Husserl, 1859—1938)的现象学、海德格尔(Martin Heidegger, 1889—1976)的存在主义是对机械论哲学的一种惩罚。就在这样的时代背景下,系统观点几乎同时呈现在各个领域。例如,科勒(Wolfgang Köhler, 1887—1967)于 1924 年提出物理格式塔概念,罗特卡(Alfred James Lotka, 1880—1949)于 1925 年研究一般系统概念,怀特海于 1925 年提出有机机械论哲学,贝塔朗菲于 1925—1926 年提出机体论,坎农(Walter Bradford Cannon, 1871—1945)于 1929 年提出内稳态思想,而贝尔纳(Claude Bernard, 1813—1878)是机体论思想的先驱,他于 1865 年已把协调、秩序、目的性等概念应用于研究有机体。贝塔朗菲的如下评述是公正的和正确的:

“从绝对不同的和甚至完全相反的出发点,从科学研究的极其不同的领域,从唯心主义哲学和唯物主义哲学,在不同的国家和社会环境里,出现了本质上类似的概念(系统等概念——引者)。这事实表明这些概念的内在必然性。这就足以说明这些共通的一般概念是正确的和不可避免的。”^①

在这样的潮流中,里昂惕夫(Wassily W. Leontief, 1906—1999)提出投入产出经济学,帕森斯(Talcott Parsons, 1902—1979)创立了

^① Bertalanffy L. v. *Problems of Life*. New York: Wiley, 1952. 198—199

结构—功能主义社会学。更值得一提的是贝塔朗菲于 1937 年提出了“一般系统理论”概念。

1.3.2 20 世纪 40—50 年代

20 世纪 40 年代是系统科学的开创时代。在第二次世界大战之中和之后,在信息产业革命的浪潮中,系统工程学、运筹学、控制论、一般系统理论、信息论等新型学科相继问世。这些理论与方法的提出标志着系统科学的真正开端。它们不仅推动了信息产业革命的发展,而且为系统科学的后来发展奠定了坚实的基础。

50 年代是系统运动兴起的时代。以 1950 年贝塔朗菲在《科学》杂志上发表的“物理学和生物学中的开放系统理论”一文为开端,在美国等一些发达国家开始出现了系统运动。

为了推进方兴未艾的系统运动,贝塔朗菲同经济学家保尔丁(Kenneth Ewart Boulding, 1910—1993)、生物数学家拉波波特(Anatol Rapoport, 1911—)、生理学家杰拉德(Ralph Waldo Gerard, 1900—1974)一起于 1954 年创立“一般系统理论学会”(后改名为“一般系统研究会”,现又改名为“国际系统科学学会”),为推进系统运动和系统科学研究奠定了组织基础。学会最初的纲领指出:

“一般系统研究会组成于 1954 年,旨在促进可在不止一个传统知识领域应用的理论系统的发展。其主要职能为:(1)研究各领域的概念、规律和模型的同型性,促进各领域之间有益的转移;(2)鼓励欠缺理论模型的领域发展适当的理论模型;(3)尽量减少不同领域中重复性的理论工作;(4)通过加强专家之间的交流来促进科学的统一。”^①

^① 转引自: Bertalanffy L. v. *General System Theory*, New York: George Braziller, 1968. 15

该学会是美国科学促进协会的一个分支机构,在美国和世界诸多国家建立了地方团体或分会。该学会出版《一般系统》年鉴,长期由贝塔朗菲和拉波波特主编。这样,一般系统理论作为一种科学理论得到科学界的承认,作为一个新的科学领域吸引了美国和世界各地的许多研究者。^①

1.3.3 20 世纪 60—70 年代

在 20 世纪 60 年代,以数学为背景的一般系统理论成为系统科学理论研究的一个前沿领域,几乎同时出现了三个理论体系,即梅萨洛维克(Mihajlo D. Mesarovic, 1928—)体系、克里尔(George J.

^① 将 1985 年以前一般系统研究会的其他情况介绍如下:

1. 国际性。该学会已成为一个国际性学术组织,通常称为“国际一般系统研究会”(现又改名为“国际系统科学学会”)。据 1984 年秋季统计,学会会员分布在全世界 40 个国家和地区,共 780 人。不少国家设有地方分会或国家级分会。

2. 学会历届主席及其专业。1956 年,未设主席;1957—1958 年, K. Boulding, 经济学; 1959—1961 年, C. McClelland, 政治科学; 1962—1964 年, R. Ashby, 控制论、运筹学; 1965 年, A. Rapoport, 数学; 1966 年, P. J. Caws, 哲学; 1967 年, J. M. Milsum, 工程学; 1968 年, M. Rubin, 信息系统; 1969 年, L. Slobodkin, 生态学; 1970 年, B. Gross, 社会科学; 1971 年, S. Beer, 控制论; 1972 年, M. Mead, 人类学; 1973 年, J. G. Miller, 医学、生命系统理论; 1974 年, G. Pask, 认知科学; 1975 年, K. Samuelson, 信息科学; 1976 年, H. V. Foerster, 电机工程; 1977 年, S. G. Vickers, 法律、行政; 1978 年, R. Ericson, 公共行政; 1979 年, B. Gaines, 计算机科学; 1978 年, R. Rosen, 生物学、数学; 1981 年, G. Klir, 计算机与系统科学; 1982 年, J. Warfield, 工程管理; 1983 年, K. Deutsch, 政治科学; 1984 年, B. H. Banathy, 教育学; 1985 年, J. A. Dillon, 物理学。

3. 出版物。共五种: (1)《一般系统》, 学会年鉴, 一年出一卷; (2)《一般系统会刊》, 通讯刊物, 季刊; (3)《行为科学》, 理论刊物, 季刊, 主编为 J. G. Miller, 1954 年创办, 1973 年起转为该学会刊物; (4)《年会及讨论会论文集》, 年会学术论文汇编, 每年出版; (5)《系统研究》, 国际系统研究联合会(一般系统研究会是其集体会员)的正式刊物, 季刊。

4. 学会专题小组。自 1979 年起, 学会会员据其兴趣和专长分成若干专题小组。共有 12 个小组: (1)哲学与理论; (2)研究方法与比较模型; (3)人力开发; (4)健康与人类生活条件; (5)社区与文化; (6)组织与社会结构; (7)信息技术与通信; (8)控制与控制论; (9)环境、能源与生态; (10)公共部门; (11)商业与工业; (12)未来与变化。

现在国际系统科学学会情况见学会网站: <http://www.iss.org>。值得一提的是国际系统科学学会 2002 年年会即第 46 届年会曾在中国上海举行。

Klir, 1932—)体系与怀莫尔(A. Wayne Wymore, 1927—)体系。

以社会科学为背景的系统理论为系统科学的发展带来了新的生机,巴克莱(Walter Frederick Buckley, 1921—)提出社会系统理论。这是系统科学研究从自然科学和数学领域延伸到社会科学领域的一个有代表性的成果。

1968年贝塔朗菲的《一般系统理论》一书问世,为蓬勃发展的系统运动提供了较完整的指导纲领。该书很快译成几乎所有的重要文种(英文初版1968年,修订版1971年,意大利文版1972年,瑞典文版1972年,日文版1972年,西班牙文版1972年,法文版1972年,德文版1973年,中文版1987年,韩文版1990年),在世界各地产生了巨大影响。

1969年7月16日美国阿波罗11号宇宙飞船登月成功,使系统工程名声大震。这是系统科学在应用领域显示其威力的一个重大事件。

在70年代,以自然科学(主要是物理学和生物学)为背景的各种系统理论为系统科学基础理论研究的深入发展开创了崭新局面。普里戈金的耗散结构理论、哈肯的协同学、槌田敦的资源物理学、米勒的一般生命系统理论、艾根(Manfred Eigen, 1927—)的超循环理论等相继问世。系统科学的理论研究以系统自组织理论为中心广泛展开。

对系统科学哲学问题的探索开始活跃起来,人们开始了对系统科学及其哲学问题的严肃的反思。贝塔朗菲所倡导的系统哲学在拉兹洛(Ervin Laszlo, 1932—)的论著中得到较全面的阐述。

系统科学领域的国际合作取得了重大进展。早在20世纪60年代后期,一些美国学者建议在苏联、东欧社会主义国家和欧美资本主义国家之间建立一个联合科学研究机构。学者们最终选择系统科学

领域作为合作领域。1973 年国际应用系统分析研究所在卢森堡成立。研究人员来自苏联、匈牙利、捷克、东德、保加利亚、罗马尼亚、美国、英国、加拿大、法国、西德、意大利、奥地利、日本等国,研究系统科学领域大量理论和应用课题,如世界能源、工业系统、城市卫生、远距离通信等。该研究所在系统科学领域的国际合作中发挥重要作用。

1.3.4 20 世纪 80 年代以后

20 世纪 80 年代以来,系统科学真是一片繁荣景象,系统运动正在席卷全世界几乎每一个角落,系统科学在人类科学知识大厦中的地位日益显耀,系统论正在充实它在现代科学思想中的主导地位,系统理论和系统方法正在渗透到人类生活的几乎所有领域。系统科学的主要成就包括下列几个方面。

理论方面:原有的各种系统理论正在取得进一步的发展。尤其在研究非线性、分叉、混沌、复杂性的热潮中,系统自组织理论取得了重大进展。各种系统理论正在趋向逻辑上的统一,系统科学体系已初步建成,系统科学基础理论——系统学的基本框架也已初步建成。在各种自组织理论的基础上,出现了建立系统进化论的基本设想。

应用方面:各国系统科学工作者为了用系统理论和系统方法解决人类所面临的各种重大系统问题作了大量工作,并取得了辉煌的成就。系统科学不仅应用于各种信息技术和其他技术领域,而且应用于各种系统的管理方面。现在,人们想用系统方法来管理的不只是工厂、学校、医院或商店,还包括一个地区、一个城市或一个国家,甚至对作为一个系统的地球的管理也被提到议事日程上。在管理方式上,他组织方式和自组织方式、直接控制和间接控制、硬控制和软控制、集中控制和分散控制正在得到有机的结合。尤其在全球化的浪潮中,由于所谓全球化正是意味着整个世界的系统化,系统科学成为正确认识和有力推进全球化的强大武器。

价值观方面:现代信息技术的飞跃发展使地球变得越来越小,人工智能、电子计算机和机器人为物质生产和其他管理活动的全盘自动化开辟了极其广阔的前景。随着信息产业和系统科学的发展,人类的价值观正在发生实质性的变化:越来越多的人认识到应该把“人当作人来使用”。就是说,人不是机器,也不是动物,人就是人,人的本质在于创造,人所从事的主要事业就应该是创造。因此,机器对人的奴役,或者人对机器的依附已经和正在成为历史的陈迹。随着人类摆脱机器的奴役,人对人的奴役已经成为时代错误。不管道路如何曲折,人类正朝着扫清这些历史垃圾的方向前进。

第二章 什么是系统学

在过去的几十年,系统学在理论和应用方面的成就是有目共睹的。但是,总的来说系统学还是一个年轻的科学领域。我曾经在广泛的范围内考察过国内外系统理论研究中出现的大量混乱的观点和倾向。就是在系统(科)学的定义问题上也存在着各种不同观点。^①

贝塔朗菲认为,系统科学是由一般系统理论(狭义)和一些专门系统(如物理系统、生物系统、心理系统、社会系统)理论组成的。

市川悌信认为,系统科学是以系统为研究对象的科学,更确切地说,是以有组织的复杂系统为研究对象的科学。

国际系统科学学会一份资料曾指出:系统科学是一种研究系统内在复杂性的多学科方法,这种方法综合在自然科学、社会科学、技术科学、行为科学和生命科学以及其他专门领域中取得的系统的研究成果,为解决总体范围内的问题提供整体论观点。

与这些观点有所不同(当然也有联系),我认为:系统科学是研究系统的类型、一般性质、运动规律、系统方法及其应用的科学技术领域,而系统学是整个系统科学的基础理论。系统(科)学之所以能成

^① 在此,我以评介他人研究成果的方式阐述自己的观点,而人们至今主要讨论的只是系统科学体系,所以这里有的人所说的“系统科学”,本来应该是“系统学”。相信读者能辨别何者应为“系统科学”,何者应为“系统学”。在我的概念体系中,“系统学”只表示“系统科学”的基础理论部分。

为一个独立的科学领域,是因为它有特定的研究对象、研究内容和研究方法。

2.1 系统学的研究对象

每一门学科都有其特定的研究对象。例如,物理学以物质及其运动为研究对象,生物学以各种生物及其运动为研究对象,社会学以人类社会及其运动为研究对象。

那么,系统学的研究对象是什么呢?

韦佛(Warren Weaver, 1894—1978)曾把科学的研究对象分为三种:经典力学研究有组织的简单事物,经典统计物理学研究无组织的复杂事物,20 世纪的科学研究有组织的复杂事物。在他看来,这又是科学发展的三个阶段。

市川惇信以更明确的形式归纳了韦佛的观点,并给出图 2—1。

这样,市川惇信把系统科学的研究对象规定为有组织的复杂系统。其中,所谓有组织,是指整体用来达到其目标的各要素及其关系在内部或外部受到某种规定。所谓复杂,是指系统的结构具有层次性,要素之间的关系具有多元性。在图 2—1 中,无组织的复杂系统、无组织的简单系统、有组织的简单系统都被排除在系统学研究对象之外。

我认为:韦佛正确地指出了科学发展的三个阶段,而市川惇信正确地指出了系统学在研究复杂系统方面的特殊作用。但是,从总体

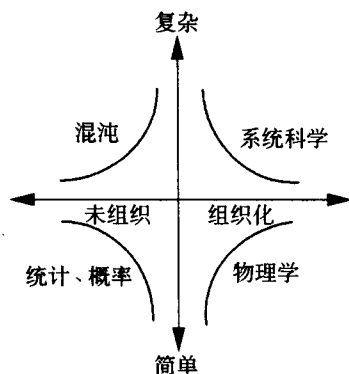


图 2—1 组织化的复杂系统

上看,图 2—1 的不合理之处是显而易见的。

一方面,图 2—1 中各象限的各种系统都可成为现代物理学的研究对象,亦可成为系统学的研究对象。随着混沌之谜在大量物质系统中被揭开,现在谁也不能把混沌排除在物理学研究对象之外。同时,随着混沌的“组织性”得到广泛承认,现在已经没有人把混沌理解为无组织的复杂现象。系统学不仅不回避混沌现象,而且将混沌现象作为当前的主要研究对象之一。

另一方面,以复杂系统为研究对象的科学未必是系统学。大量的物理系统、生物系统、社会系统、思维系统都是复杂系统,但是以它们为研究对象的物理科学、生物科学、社会科学和思维科学却不是系统学。因此,将系统学的研究对象一般地规定为复杂系统是不妥当的。这种看法无助于阐明系统学与其他以复杂系统为研究对象的学科之间的区别。

实际上,系统学的研究对象是一般系统或系统本身,即是说,系统学要揭示在一切系统中起作用的系统规律。从某种意义上说,任何具体系统都不是系统学的研究对象,因为它们不是一般系统;从另一种意义上说,任何具体系统都可成为系统学的研究对象,因为一个研究对象只要是一个系统,就必定具有一般系统特性。

当我们把各种具体系统分成简单系统和复杂系统时,系统学主要研究复杂系统(“有组织的”和“无组织的”),但是并非不研究简单系统(“有组织的”和“无组织的”)。在与以复杂系统为研究对象的其他科学的关系上,系统学的特点在于它以所有的复杂系统为研究对象,要揭示在所有复杂系统中起作用的系统规律,而其他科学则以根据传统的分类方法加以分类的某一特定系统类型(如生物系统、社会系统等)为研究对象。

一般地说,系统学所要揭示的是适用于各种不同质的系统的,跨层次、跨领域、跨学科的系统规律。这些系统规律打破了根据传统分

类原则加以划分的不同层次、不同领域、不同学科之间的界限。当然,系统学的一些分支学科也以某一类系统为研究对象。但是,这些学科所要揭示的也不是在有关系统类型中起作用的传统科学规律,而是其中的系统规律。

2.2 系统学的研究内容

各种不同质的系统之所以能遵循统一的系统规律,是因为这些系统之间存在着同型性。不同系统之间的同型性既是系统学赖以成立的客观基础,又是系统学的基本研究内容。

2.2.1 什么是同型性

在科学文献中,同型性有不同的称呼,如同构性、同形性或形式一致性。在最广泛的意义上,可以把同型性理解为不同质的系统在其存在方式或运动方式上的一致性(类似性或相似性)。不同系统之间既可能在结构或形式方面存在着同型性,亦可能在功能方面存在着同型性。

当我们可以用相同的数学模型表示不同质的具体系统时,就可以认为这些具体系统是互为同型的。数学模型通常是用一组要素(例如,数、点、向量、矩阵等)和它们之间的特定关系来规定的。当一个数学模型的各要素与另一数学模型的各要素之间有一一对应关系,且一个模型各要素之间的所有关系适合于另一模型各对应要素之间的关系时,就称这两个模型是互为同构的。两个数学模型之间的同构意味着两个具体系统在概念上的同型性。即是说,当两个具体系统可用相同的数学模型表示时,它们在概念上就是互为同型的。

例如,图 2—2 所示的谐振子和电路从其构成要素上看,是两个

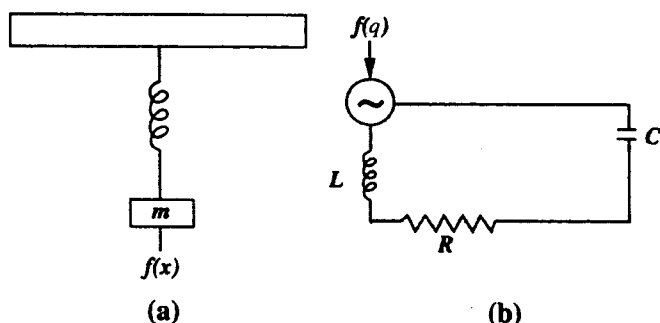


图 2—2 谐振子与电路

截然不同的系统。如图 2—2(a)中,重物的位移为时间的函数 $x(t)$, 是二阶微分方程

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + cx = f(x)$$

的解。其中, m 为重物质量, r 为摩擦系数, c 为弹性系数, $f(x)$ 为垂直作用于重物上的外界作用力。

在图 2—2(b)中,任意一点的电荷量为时间的函数 $q(t)$, 是二阶微分方程

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + C^{-1}q = f(q)$$

的解。其中, L 为电感, R 为电阻, C 为电容, $f(q)$ 为由外界施加的电动势。

比较这两个方程,可知有下列对应关系:

$$x \leftrightarrow q, m \leftrightarrow L, r \leftrightarrow R, c \leftrightarrow C^{-1}$$

而且,谐振子模型的各要素之间的所有关系适合于电路模型中各要素之间的关系。这样,这两个系统就具有严格同型性。

一般地说,数学上同构的任意二个系统之间都存在着严格同型性。但是在现实中更常见的是不同系统之间的统计同型性、准同型性、相似性或类似性。

同型性不仅表现在可以用数学模型表示的具体系统之间,而且

还表现在那些至今不能用数学模型描述的许多领域。例如,原始人关于四方、四季、四色、四物之间的联想是基于不同系统之间的同型性产生的。原始人认为有下列对应关系:

东	南	西	北
春	夏	秋	冬
蓝	红	白	黑
龙	鸟	虎	龟

在现代人看来十分可笑的这种联想对于原始人来讲却十分自然。互渗律支配着原始人的原始思维^①,而互渗律的根据之一就是不同系统之间的同型性。如果说同型性在原始人那里所造就的是原逻辑思维,那么它在现代人这里所造就的便是系统思维以及在其基础上发展起来的系统学。

2.2.2 同型性的根据

从经验上把握不同系统之间的同型性并非困难,但是要从逻辑上证明同型性的存在却是很困难的。下面,我们从三个方面考察不同系统之间存在同型性的理由。

首先,实在的各种系统之间存在着同型性。这是由于现存的一切事物都是从同一的原始状态进化而成的。当实在的原始状态展开成现今状态时,虽然这一过程中充满着创生,但是原始状态作为进化的原点,以各种方式制约着创生过程和创生结果。这种制约使得实在的原始状态、各种中间状态和现今状态之间存在着同型性。例如,在生物进化中,核酸和蛋白质的超循环进化产生最初的原生细胞,单

^① 想要了解“原始思维”、“互渗律”等概念的读者,请看法国社会学家列维-布留尔的著作:原始思维。丁由译。北京:商务印书馆,1981

细胞生物经过漫长的进化历程,最终产生人类,从而使不同层次生物的同型性成为可能。

其次,实在与科学规律之间存在着同型性。科学规律是科学研究的产物,而科学研究作为一种研究过程,首先是一个反映过程。在一切反映过程中,反映的内容来自被反映者(实在),反映的形式取决于反映者(认识主体)。认识主体是实在与科学规律之间的桥梁与中介。这三者之间的关系可表示为

$$\text{实在} \rightleftharpoons \text{认识主体} \rightleftharpoons \text{科学规律}$$

这里,认识主体之所以能反映实在,是因为这两者之间能发生共振;认识主体和实在之所以能发生共振,是因为这两者之间存在着同型性;而认识主体与实在之间之所以存在着同型性,是因为认识主体不仅是实在的进化的最高产物,而且是现存的实在的一部分。另一方面,因为认识主体的结构直接控制着科学规律的形式,所以认识主体和科学规律之间也存在着同型性。例如,对正常人来讲,形式逻辑的规律是思维的基本规范,任何科学规律都必须遵从形式逻辑的规律,而形式逻辑的规律之所以成为基本的思维规律,归根结底是因为人类的大脑结构基本上是同质的。这就决定了认识主体与科学规律之间的同型性。这样,实在与科学规律在认识主体的中介下互为同型。

最后,不同学科科学规律之间存在着同型性。从以上两方面的讨论中,我们已经从理论上阐明了不同学科科学规律之间存在同型性的理由。在经验上,我们到处可以看到这种同型性。图 2—2 所示的谐振子和电路的同型性显然是一个典型例子。又如,指数增长规律适用于某一细菌细胞、细菌群体、动物群体、遗传学、科学学、社会学等领域。这里,所考察的对象是完全不同的,但描述其增长的指数规律是一致的。再如,库恩(Thomas Samuel Kuhn, 1922—1996)关于科学革命的理论显然也是以不同学科科学规律之间的同型性为前

提的。实际上,整个科学学的概念基础就在于不同学科科学规律之间的同型性。

从上可知,只要我们的研究对象或研究结果是以某种系统形式存在,那么这些系统之间就必定存在着同型性。这样,系统学的基本任务就在于在最广泛的范围内揭示实在系统之间的同型性、实在系统与科学规律之间的同型性以及不同学科科学规律之间的同型性。由此发现的规律就是所谓的系统规律。

2.2.3 同型性的分类

各种具体系统之间存在着多种多样的同型性。例如,一座建筑物与它的设计图之间存在着结构上的同型性;人脑和电脑之间存在着功能上的同型性;生物的亲代与子代之间存在着表型和遗传型方面的同型性;各种不同系统的进化之间存在着进化模式、进化机制等方面的同型性;诸如此类。对这些同型性怎样进行分类,是个很复杂的问题。当我们对各种具体系统考虑其个体、类型和层次时,就可以把同型性分为下列三种。

一、不同系统层次之间的同型性

当我们把一个系统分成若干个层次时,就可以发现不同层次之间存在着同型性,称之为跨层次同型性。例如,在生命系统的五个层次(细胞、器官、生物体、群体和组织)上所进行的实验研究表明,这五个层次在信息的输入—输出关系上存在着同型性,如图 2—3 所示。就这些系统的某个单信道而言,在最初一段时间内,随着输入的增加,信息输出也几乎成比例地增加;当信息输入增大到一定数值时,信息输出就稳定在一定数值;当信息输入超出这一数值时,信息输出就逐渐下降,并趋近于零,或者发生信息输入超载下的混乱现象。实际上,这一结果同样适用于生命系统的其他层次(如社会系统、超国家系统等)。

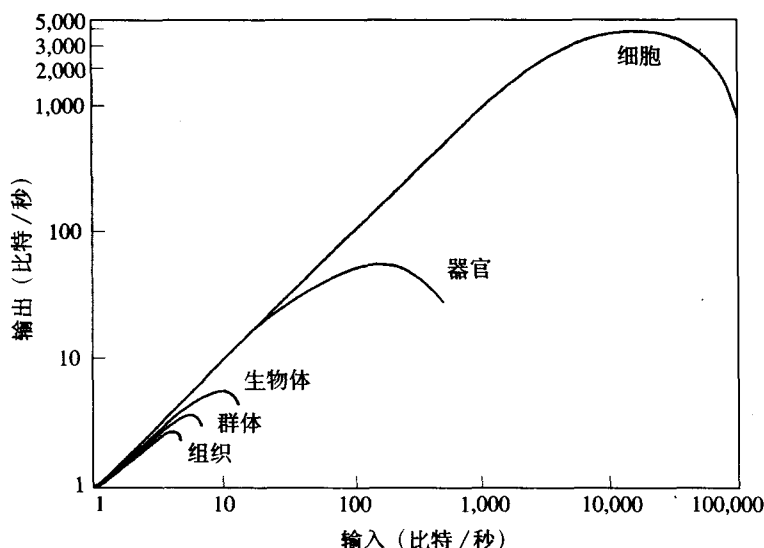


图 2—3 生命系统的五个层次在信息处理方面的同型性

Miller J G. *Living System*. New York: McGraw-Hill, 1978. 192

二、不同系统类型之间的同型性

当我们把同一层次上的各种系统或不同层次上的各种系统根据系统个体的同质性分成若干系统类型时，同样也可以发现这些不同系统类型之间的同型性。例如，根据体质形态上的某些共同遗传特性（如肤色、发色、发型、眼色、血型等），可将全世界人类分为三大人种，即蒙古人种、尼格罗人种和欧罗巴人种。不同人种之间，在形态上和血型频率上虽有一定区别，但无明显界限，也就是说不同人种之间存在着基本的同型性。实际上，这种同型性使医学成果可适用于不同的人种。

从表面上看完全不同的系统类型之间的同型性也是不难发现的。例如，人体结构与一些哺乳类动物的结构之间的同型性使人们可以通过对一些动物的解剖帮助了解人体结构；生物结构与机械结构之间的某些同型性使生物力学的研究成为可能；机器人的功能是

模拟人的大脑功能制造出来的,所以这两者之间显然存在着某种同型性。

三、不同系统个体之间的同型性

在同一系统层次内部,不同系统类型的划分是以系统个体的同质性为根据的,这里所说的同质性包含着同型性。当我们对两个不同系统类型进行比较时,通常是对一个系统类型中的典型个体和另一系统类型中的典型个体进行比较。因此,一般来说,不同系统个体之间的同型性是不同系统类型之间同型性的基础。例如,人类中各个人之间的同型性要比人类与动物之间的同型性明显得多。

从某种意义上说,现实中的一切具体系统都是同型的,在这种同型性下这些系统都是等同的。不同系统个体之间的同型性可表现为:支配其要素属性的规律是同型的;其要素之间的关系是同型的;从其要素到系统的突现过程是同型的。

在系统学中,根据所研究的是所有系统个体之间的同型性,还是系统类型之间或系统层次之间的同型性,就可以区分出一系列的分支学科。

2.2.4 同型性的科学意义

围绕同型性概念在科学研究中的作用问题,科学家们进行了旷日持久的争论。贝塔朗菲、米勒等人一直强调同型性(形式一致性)概念的极端重要性,而亨佩尔(Carl Gustav Hempel, 1905—1997)、阿科夫(Russell Lincoln Ackoff, 1919—)等人却全盘否定同型性概念的科学价值。我认为,同型性不仅是系统学的基本研究内容,而且它首先是系统学赖以成立的基本依据。不仅如此,同型性概念在科学研究中还具有深刻的认识论方面的和方法论方面的意义。

一、同型性是各种认识活动的基本依据

认识活动以对象世界、认识主体和认识结果(知识)的同型性为

前提。因此,认识过程就表现为对象世界的同型性通过对象世界与认识主体的同型性升华为与对象世界相同型的认识结果的过程。如果考虑到认识过程不仅是认识主体对对象世界的反映过程,而且是认识主体与对象世界之间的相互作用过程,那么认识主体作为对象世界与认识结果之间的中介所起的作用就更为引人注目,同型性在其中所起的作用也就更为一目了然。认识过程是同型性的发现与创造过程。

另一方面,实践过程也是以对象世界、认识主体和认识结果的同型性为基础的。当然,实践过程的直接产物不是知识,而是与认识结果相同型的新的对象世界,即各种人造物。

这样,对象世界、认识主体和认识结果在结构上或形式上的吻合程度不仅左右着认识活动和实践活动的成功与否,而且标志着认识活动和实践活动的价值。

二、同型性是各种科学研究方法的基本依据

人们在科学研究领域早已使用了各种研究方法,如归纳方法、演绎方法、类比方法、模拟方法、移植方法、系统方法等。这些方法都可以从同型性概念中找到其概念基础。同时,在创造科学中所使用的各种创造技法,如综摄法、等值变换法、KJ法^①、NM法^②、ZK法^③等也可以从同型性概念中找到其概念基础。

现以移植法为例,讨论同型性概念在科学研究中的作用。贝弗里奇(William Ian Beardmore Beveridge, 1908—)曾指出:“有的时候

① KJ法:日本人类文化学家川喜田二郎提出的一种创造性开发方法。KJ是其姓名的罗马字标记 Kawakita Jiro 的缩写。

② NM法:日本创造学家中山正和提出的一种创造性开发方法。NM是其姓名的罗马字标记 Nakayama Masakazu 的缩写。

③ ZK法:日本经营学家片方善治提出的一种创造性开发方法。ZK是其姓名的英文标记 Zenji Katagata 的缩写。

候,决定一项研究的基本思想是来自应用或移植其他领域里发现的新原理或新技术。这种取得进展的方法称为研究中的‘移植’法。这也许是科学研究中最有效、最简便的方法,也是在应用研究中运用最多的方法。”^①在科学史上,人们经常看到,类似的观点、模式和规律经常独立地和基于不同的事实出现在相当不同的领域。有许多事例证明,这是因为一个领域的研究者不了解他所需要的理论结构已在其他一些领域取得了充分的发展,或者说因为这些研究者没有认识到不同对象系统之间的同型性或不同科学规律之间的同型性。另一方面,许多成功的实例表明,基于移植法,人们可以把在一个领域获取的概念、原理和定律合理地从这个领域扩展到另一些领域,可以使不同领域的科技工作者避免一些重复性劳动,也可以在研究一些十分复杂、难以处理的现象时使用较简便的已知模型。移植法之所以能成功,显然是由于不同系统之间存在着同型性。

三、同型性是实现科学统一的一个概念基础

科学研究的最终目标是建立适用于对象世界的统一科学,而人类实践活动的最高理想是在对象世界中实现人的自由个性。

统一科学所要揭示的是世界的统一性。在不同的时代,在不同的领域,科学家们为了揭示世界的统一性作了不懈的努力,提出了各种各样的方案。物理主义者试图用物理概念、物理原理和物理定律来解释一切自然的、社会的和思维的现象。但是现在很少有人相信这种尝试能获得成功。后来产生的生物主义也只不过是物理主义建造的新的避难所。正如贝塔朗菲所指出:“物理主义把生物体看成物理-化学事件的奇怪的组合或机器,而生物主义把人类看成一个古怪的动物种类,把人类社会看成一个蜂房或配种站。”^②

① 贝弗里奇. 科学研究的艺术. 北京:科学出版社,1979. 133

② Bertalanffy L. v. *General System Theory*, 1968. 88

显然,无论物理学还是生物学都很难完成建立统一科学的任务。我们不能把一切自然的、社会的和思维的现象都归结或简化为物理学或生物学原理。但是我们可以在对象世界的各个领域找到同型性,建立阐述这些同型性的科学。这就可以为科学的统一即统一科学的建立提供一种新途径、新方案和新方法,可以说,在同型性概念基础上建立起来的系统学是实现科学统一、建立统一科学的一个最有前途的领域。它要揭示各种系统的同型性,要揭示在一切系统中起作用的系统规律(当然,它的分支学科也力求揭示在某一类系统中起作用的系统规律)。系统学不仅是现代科学创造活动的一个伟大成果,而且是推动现代科学创造活动的强有力的动力。随着系统学的发展,同型性概念将为科学的统一发挥越来越大的作用。

2.3 系统科学的体系

如果对系统科学的基本研究内容加以细化,就可得到系统科学的各个分支学科;如果对系统科学的各个分支学科加以系统化,就可得到系统科学的体系。如同其他科学初创时期的情形一样,系统科学在它产生和发展的早期阶段并没有形成一个体系。不同国度、不同知识背景的学者们针对他们所感兴趣的各種系统问题提出了多种多样的新概念、新观点、新原理和新理论。当这些研究成果积累到一定程度之后,关于系统科学研究内容的系统化问题即系统科学体系问题就被提到议事日程上来。这一方面是由于系统科学本身的发展需要,另一方面是由于教学工作的需要。从20世纪60年代起,系统科学界开始重视系统科学的构成与体系问题,试图把系统科学的各種研究内容整理成一个较完整的体系。

下面,将先介绍国内外学者关于系统科学体系的三种有代表性的观点,然后提出我自己关于系统科学体系的基本方案。

2.3.1 贝塔朗菲的体系

关于系统科学体系的研究始于 20 世纪 60 年代。最早讨论系统科学体系的是贝塔朗菲。不过,他是以讨论一般系统理论体系的方式讨论了系统科学体系和系统哲学体系的。他于 1968 年发表的《一般系统理论》一书,总结了他几十年的研究成果,在全世界产生了极大的影响,甚至被誉为系统理论界的一部“圣经”。凡是读过这本书的人一般都承认,这是一本读不完的书,作者广博的知识、深刻的思想、敏锐的洞察力和出众的智慧,对系统科学和系统哲学的发展产生了不可估量的深远影响。但是,另一方面,作者对一般系统理论的叙述之不系统程度或混乱程度实在令人失望,使人吃惊。后来,贝塔朗菲在 1971 年的论文“一般系统理论的历史和现状”中为一般系统理论提供了较为系统的体系,他的一般系统理论体系可概括为图 2—4。

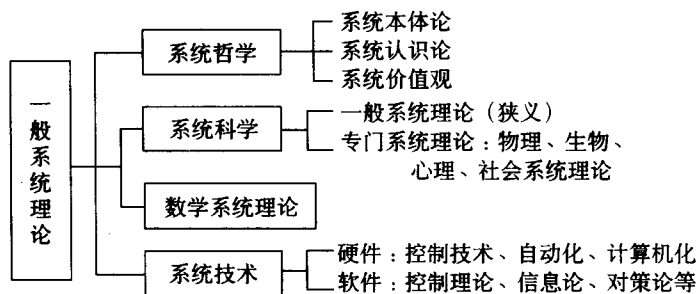


图 2—4 贝塔朗菲的一般系统理论体系

一、系统哲学

系统哲学研究由于“系统”成为新的科学范式(区别于经典科学的分析性的、机械论的、线性因果关系的范式)而产生的思维和世界观方面的变化。系统哲学包括系统本体论、系统认识论和系统价

值观。

系统本体论的任务在于说明“系统是什么”，在被观察的世界的各个层次上系统是怎样被实现的。可以区分实在的系统即被感知的或从观察推导出来的系统和不依赖于观察者而独立存在的系统。另一方面，存在着概念系统，如逻辑或数学，它们实际上是符号结构（但也可以把音乐包括在内）；抽象系统（科学）是与实在相对应的概念系统，是概念系统的一个子类。

系统认识论完全不同于逻辑实证主义和经验主义的认识论。它认为，感知不是对“实在事物”的反映，认识也不是对“真理”或“实在”的单纯的近似。认识是认识者与被认识者之间的相互作用，它有赖于生物、心理、文化、语言等方面的大量因素。物理学也已否定了不依赖于观察者而独立存在的如粒子或波这样的最终本质。由此，系统认识论主张“透视论”观点，反对还原论观点。

系统价值观研究人与世界的关系。如果实在被视为有组织整体的等级，则人的形象应该区别于物理粒子世界中的事物，在这个世界中偶然事件作为最终的惟一“真正的”实在支配着物理粒子。符号、价值、社会和文化的领域也是很“实在的”，而它们夹在宇宙等级秩序中正好填平了斯诺（Charles Percy Snow, 1905—1980）所说的“两种文化”之间的鸿沟，即科学与人文科学、技术与历史、自然科学与社会科学，或者所有这类对立面之间的鸿沟。因此，系统价值观强调人本主义观点，反对贬低人的价值的机械论倾向。

二、系统科学与数学系统理论

首先，需要研究人们所观察的宇宙中的大量实在系统，即对各种不同的具体科学（如物理学、生物学、心理学、社会科学等）的系统进行科学的理论研究。重要的是不仅要了解整体的各个部分，而且要了解各部分之间的关系，如细胞中各种酶的相互作用、个性中有意识和无意识过程的相互影响、社会系统的结构与动态、不可逆热力学中

广义力和广义流的相互作用等。另一方面,从不同侧面上研究各种系统也可以形成各种专门系统理论,如开放系统理论、等级系统理论、统计系统理论等。

其次,需要研究各种系统的一般方面、一致性和同型性。这是原来意义上的一般系统理论的基本任务。不同系统之间的同型性乃是一般系统理论的基本研究内容。一般系统理论还强调对“整体”和“整体性”的科学探索,而这些概念在近代科学研究中被看作是越出科学界限的形而上学的概念。由于一般系统理论的概念、模式和原则具有跨学科性质,它能为科学的统一提供一种可能的途径。

其三,数学系统理论是一个重要领域。准确的数学语言能够用演绎方法建立、证实或推翻一种理论。在建立数学系统理论的公理化方法中,中心问题是对系统做出严格的定义并运用现代数学和逻辑方法推导出它的有关方面。在这个意义上,可以说一般系统理论属于逻辑和数学领域。这里重要的是发展动态系统理论,它研究系统随时间的各种变化。主要采用两种基本的描述方法,即内部描述(或称结构描述)和外部描述(或称功能描述)。

三、系统技术

现代技术和社会很复杂,按部门划分技术的传统方法已不能令人满意,必须使用跨学科性质的系统方法,培养通才或具有多学科知识的人。这在生态系统、国家机关、教育机构、社会经济制度、国际关系以及工业、商业、战备等方面容易得到说明,因为这些问题都涉及到大量变数之间的相互关系。

系统技术由两个方面构成,其一是“硬件”,如电子计算机、自动装置、自动调节机构等,其二是“软件”,即系统概念和理论在社会、生态、经济等问题中的应用,如控制理论、信息论、对策论、决策论、回路理论、排队论等。

2.3.2 市川惇信的体系

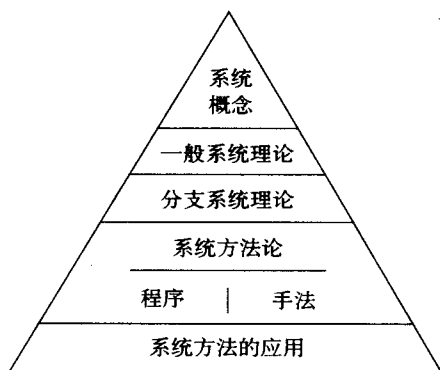


图 2—5 市川惇信的系统科学体系

介绍的。他认为：作为一种科学的系统科学，必须具备系统概念、理论体系和方法论。系统科学作为一门科学，由系统概念、一般系统理论、分支系统理论、系统方法论（包括程序和手法）以及系统方法的应用（他称为“向对象的系统处理法”）这五个部分构成，如图 2—5 所示。

一、系统概念

这一层次为系统科学的发展提供指南。要深入研究系统、要素、关系、同型性等概念。

二、一般系统理论

这一层次以系统概念为基础展开严密的理论。通过公理而定义要素的集合与其中的关系，进而通过一切系统的同型性，获得对系统的深刻理解。

如果着眼于一切系统所共有的同型性的不同侧面，或者以不同方式处理一切系统所共有的同型性，就可建立不同的理论体系。

梅萨洛维克的一般系统理论体系：要素的输入输出关系通过要素之间的关系而成为系统的输入输出关系。根据这个观点，以系统的寻的行为与要素的寻的行为之间的关联为中心建立理论体系。

怀莫尔的一般系统理论体系：重视系统的状态转移，将系统看作状态转移机构，由此建立理论体系。

克里尔的一般系统理论体系:根据系统的类型和特征,把系统加以分类,从而阐述各种系统的全貌。

目前,一般系统理论可以说是已经发展到根据对系统的统一观点进行预测的阶段,成为推进系统分析和系统合成的有效方针。

三、分支系统理论

在这一层次上,通过限定系统的范围,或者限定操作范围,来建立处理系统的具体而有用的各种系统理论。例如,在系统结构研究方面有各种数量化理论和图解理论;在模型研究中有模型的建立、确认和实现的各种理论;在系统信息流研究中有控制论和信息论;在决策方面有决策论、对策论、数理规划。为处理系统的分析、规划、设计和运用等方面的具体问题,通过援引相关理论把各种问题表示为数学式子,提供解决这些问题的程序。

四、系统方法论

在这一层次上,要建立系统目标,并为了对系统进行分析、规划、设计和运用而集中所能运用的各种具体手段。这里有程序和手法。程序把处理系统问题的具体步骤加以体系化。手法是指在实行程序方面适用于对象的方法和工具,包括把上一层次的各种系统理论具体化为算法的数理方法和积极引用人类的知识、经验和理解力的所谓“软手法”。此外,还有把这两种方法结合在一起的人机对话方法,其中用电子计算机进行数值计算,依靠人的判断力处理无法进行数值计算的问题。

五、系统方法的应用

在这个层次上,要把系统科学的思路和关于对象本身的各种观点集中起来解决具体的系统问题。这是系统科学的应用领域,又是系统科学赖以发展的重要领域。值得注意的是,必须认识各个系统的个别性,从中获得解决问题的适当方法。采用划一的机械的系统方法,反而会发生危险。

2.3.3 钱学森的体系

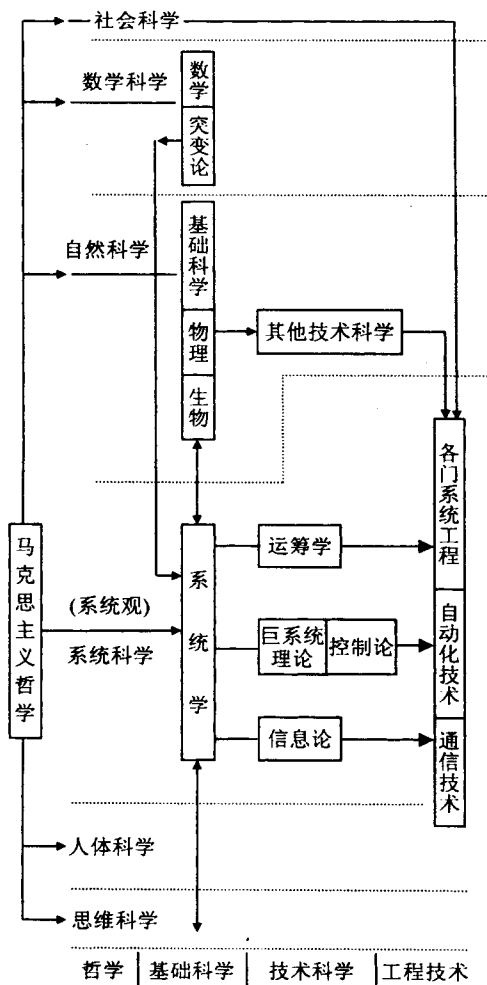


图 2—6 钱学森的系统科学体系

钱学森等.论系统工程.长沙:湖南科技出版社,1982.265

著名学者钱学森从1979年起关于系统科学体系发表了很有价值的观点和设想。他把现代科学技术分成几个部门，如数学科学、自然科学、社会科学、思维科学、系统科学、人体科学、军事科学、文学艺术等。另一方面，把现代科学技术分成若干个层次，即：用来解决各种实际问题的工程技术，直接为工程技术作理论基础的技术科学，作为技术科学的理论基础的基础科学，以及作为对科学技术的最高概括的马克思主义哲学。

钱学森用这一科学技术体系结构层次的观点考察了系统科学体系。他认为：系统科学是由系统工程这类工程技术，系统工程的理论方法像运筹学、控制论和信息论这

类技术科学,以及系统的基础理论系统学等组成的一个新兴科学技术部门。他的系统科学体系如图 2—6 所示。

系统学是系统科学的基础理论。他说:“我认为把运筹学、控制论和信息论同贝塔朗菲、普利戈金、哈肯、弗洛里希、艾肯等人的工作融会贯通,加以整理,就可以写出《系统学》这本书。”^①他还说:“我看,‘耗散结构理论’、‘协同学’……都是过往云烟,留下的将是系统学。当然创造耗散结构理论和协同学的普利戈金和哈肯是大有功劳的。”^②

运筹学、控制论和信息论是系统科学的方法理论,是各种系统工程共同理论基础。这里,运筹学包括线性规划、非线性规划、博弈论、排队论、库存论、决策论、搜索论等。此外,计算科学和计算技术也是系统工程共同理论基础。

系统工程包括一大类工程技术,如工程系统工程、科研系统工程、企业系统工程、信息系统工程、军事系统工程、经济系统工程、环境系统工程、教育系统工程、社会(系统)工程、计量系统工程、标准系统工程、农业系统工程、行政系统工程、法治系统工程等。每一种系统工程有与之相对应的特有学科基础,如下表所示。

表 2.1 系统工程的分类

系统工程的专业	专业的特有学科基础
工程系统工程	工程设计
科研系统工程	科学学
企业系统工程	生产力经济学
信息系统工程	信息学、情报学
军事系统工程	军事科学
经济系统工程	政治经济学

①② 钱学森等. 论系统工程. 长沙:湖南科技出版社,1982. 5

(续表)

系统工程的专业	专业的特有学科基础
环境系统工程	环境科学
教育系统工程	教育学
社会(系统)工程	社会学、未来学
计量系统工程	计量学
标准系统工程	标准学
农业系统工程	农业学
行政系统工程	行政学(?)
法治系统工程	法学

钱学森等. 论系统工程. 长沙: 湖南科技出版社, 1982. 180

在钱学森的体系里, 马克思主义哲学与系统学的桥梁, 被称为“系统观”或“系统论”, 它将成为辩证唯物主义的一个组成部分。

2.3.4 我的方案

贝塔朗非、市川惇信和钱学森以及其他学者们关于系统科学体系的设想是很有价值的。在这些设想的基础上, 这几年我自己也发表了关于系统科学体系的设想, 其中不仅考察了系统科学的总体系, 还考察了其组成部分的内部结构, 如图 2—7 所示。

从总体上看, 系统科学有三个组成部分, 即系统学(Systemology)、系统方法学(Systems Methodology)和系统技术(Systems Technology)。这三个部分相结合而构成一个完整的系统科学体系。

一、系统学^①

“系统学”(原文为俄文 Системология)一词最早于 1965 年出现

^① 我在“什么是系统学”一文中, 简明扼要地阐述了系统学体系。朴昌根. 全球化与韩国的应对. 汉城: 白山资料院, 2003. 72—81; <http://www.survivor99.com/pscience/thesis/piao0310.htm>

在苏联的哲学文献,从1968年起出现在苏联的科学文献,用来表示关于系统的一般科学。到了80年代,在苏联已经出现了几本以《系统学》为书名的著作。另一方面,欧美系统科学界长期以来一直用“一般系统理论”(狭义, General System Theory)来表示关于一般系统的理论(Theory of General System)或关于系统的一般理论(General Theory of Systems),也就是系统科学的基础理论。但是考虑到“一般系统理论”一词的使用已很混乱,我从1982年起也采用“系统学”一词来表示系统科学的基础理论,并就此有关的问题发表了一些论文和著作。^①

系统学是系统科学的基础理论。系统学研究一

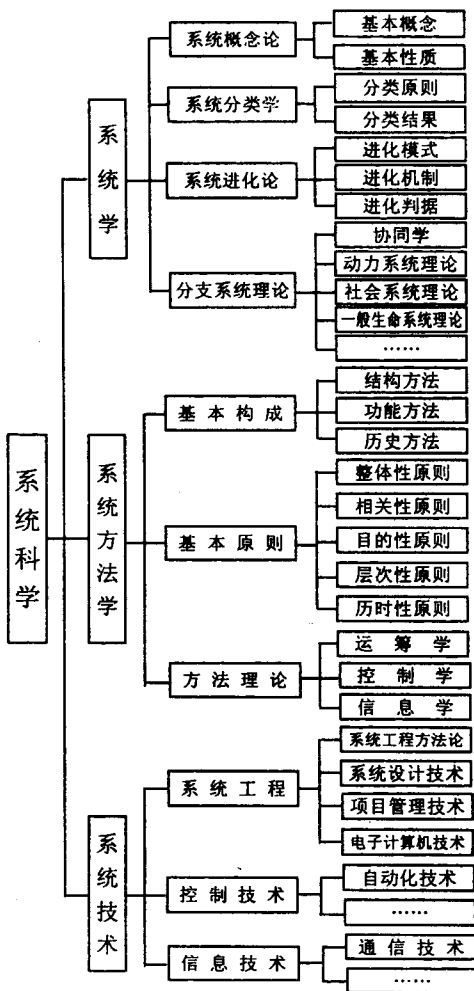


图 2-7 系统科学的基本框架

^① 朴昌根. 系统科学论. 西安:陕西科技出版社, 1998

般系统的基本概念、基本性质和基本规律以及系统分类。它在系统科学中的地位可以比作物理学在自然科学中的地位。系统学由系统概念论、系统分类学、系统进化论以及若干其他分支学科组成。

1. 系统概念论

亦可称为系统概念研究。为建立系统学的逻辑体系,首先需要深入研究系统以及与之有关的一系列基本概念和系统的基本性质。这是系统概念论的基本任务。

需要研究的基本概念有系统、结构与功能、子系统和分系统、信息与熵,等等。需要研究的基本性质有整体性、稳定性、适应性、等级性、历时性等。

为了对这些概念和性质给出严格的描述需要作大量数学上和概念上的工作。

2. 系统分类学

如同在生物学上分类学是一个重要的分支学科一样,系统分类学是系统学的一个重要分支学科。

我们知道,系统学是研究一般系统的,但是关于一般系统的研究只有通过各种具体系统的研究才能深入展开,而为了深入研究各种具体系统,对各种具体系统的分类是必不可少的。

在进行系统分类时,我们既可以从各种现实系统的实际内容出发,亦可以从系统模型出发;既可以从系统自身的特性出发,亦可以从研究目的或需要出发。在不同的分类标准下,会有不同的分类结果。

3. 系统进化论

在各种具体系统研究中,人们提出了各种进化理论,如达尔文(Charles Robert Darwin, 1809—1882)的生物进化论、克劳修斯(Rudolf Julius Emanuel Clausius, 1822—1888)的熵原理、马克思的唯物史观、艾根的超循环理论等。在一般系统研究中,人们又提出了

多种进化理论,如普里戈金的耗散结构理论、哈肯的协同学、拉兹洛的广义进化论、费根包姆(Mitchell Jay Feigenbaum, 1944—)等人的混沌理论等,而这些理论通常被称为“系统自组织理论”。有的学者还倡导过“负熵学”一词。但是考虑到所有这些用语的局限性,我在1982—1983年期间提出“系统进化论”(Systems Evolutionary Theory)概念,并规定它的任务是研究适用于各种具体系统的一般进化原理。我认为,系统进化论在它的完成的形式上一定能把现今的各种“自组织理论”统一起来。

系统进化论的科学基础是各种具体系统的进化理论、系统概念论和系统分类学。系统进化论通过研究在各种具体系统中出现的无序—有序,有序—有序、有序—混沌的转变过程,阐明系统进化趋势、系统进化机制、系统进化模式、系统进化判据等。

系统进化论是当前系统学研究的前沿。系统进化研究已经从封闭系发展到开放系,从平衡系发展到非平衡系,从线性系发展到非线性系,从简单系发展到复杂系。

4. 其他分支学科

上述的系统概念论、系统分类学和系统进化论是系统学的三个基本领域。此外,有一些现有的系统理论,如协同学、动力系统理论、混沌理论、一般生命系统理论、社会系统理论等可作为系统学的分支学科。就中国现状而言,最薄弱的是一般生命系统理论和社会系统理论研究。

二、系统方法学

系统科学不仅有理论上的意义,而且有方法论上的意义。从总体上看,在我们这个时代占主导地位的科学方法无疑是系统方法。系统方法在科学、技术和生产中的作用日趋明显,而它本身就是我们时代的科学、技术和生产的需要的产物。因此,真正掌握和灵活运用系统方法,对于处理人类所面临的各种复杂系统问题有着极其重要

的意义。

从一般原理上看,系统方法既不同于传统的整体论方法,也不同于传统的还原论方法,它克服了这两种方法的缺陷,整合了这两种方法的优点。

在最广泛的意义上,所谓系统方法,是指用系统概念去认识和解决各种实际系统问题的方法论体系,也就是用系统学的基本观点去认识和解决各种实际系统问题的一整套模式。

系统方法要求把研究对象当作一个系统,从系统总体出发,在系统与要素、要素与要素、系统与环境的相互作用中揭示和处理研究对象的性质和运动规律。

系统方法强调定性研究和定量研究的结合;解决各种系统问题,既不能只靠定性研究,也不能只靠定量研究。只有在把两者有机地结合在一起时,才能正确地认识和有效地解决这些问题。

系统方法学主要研究下列三方面的内容。

1. 系统方法的基本构成

对于系统方法的构成问题,有各种不同的观点。我认为:系统方法是结构方法、功能方法与历史方法的辩证统一。

所谓结构方法,是朝内的研究方法。它基于系统的内部描述,要求把握系统功能所依赖的结构。结构方法可分为三种操作:结构优化操作、结构模拟操作和结构还原操作。

所谓功能方法,是朝外的研究方法。它基于系统的外部描述,把系统当作“黑箱”,在系统与环境的相互作用中把握系统的功能。功能方法又可分为三种操作:功能优化操作、功能模拟操作和功能还原操作。

结构方法与功能方法广泛应用于作为一个系统的统一体及其统一性保持不变(尽管其组成部分发生变化,但其结构与功能相对稳定)的情况,而历史方法则要求从系统的历时性及系统进化规律

出发,揭示系统随时间的变化即系统的产生、发展、老化和消亡过程,弄清系统及其要素的寿命,及时处理系统及其要素的淘汰与更新问题。在此,既要重视系统发展的历史趋势,也要重视系统发展的阶段性。

2. 系统方法的基本原则

在用系统方法研究(或研制)某一系统时,需要遵循下列基本原则。

整体性原则:研究任何系统都必须从整体出发研究部分,通过对部分的研究加深对整体的研究。

相关性原则:研究任何系统都要研究其要素与要素、要素与系统、系统与环境之间的各种相互关系。要从关系的内容、性质和复杂性上正确把握各种相互关系,正确把握这些相互关系之间的相互关系。

目的性原则:研究系统不仅要弄清系统可能(或应该)达到何种终极状态(目的),而且要研究终极状态对系统现时状态及其变化的影响。

层次性原则:亦称等级性原则。研究系统既要弄清其内部等级,又要弄清它在系统等级序列中的地位,既要把握不同系统等级的特殊性,又要把握不同系统等级之间的同一性。

历时性原则:必须坚持发展变化的观点,在时间流中,在历史进程中研究和处理各种系统。在系统的历时变化中把握系统的相对静止,在系统的相对静止中把握系统的历时变化。

3. 若干方法论学科

为了真正掌握系统方法,除了了解系统方法的定义、基本构成和基本原则外,还必须掌握一些为解决各种系统问题所需的方法理论。目前,系统科学的方法论学科主要有运筹学、控制学(包括控制论及其“家族”成员,如经典控制理论、现代控制理论、系统动力学、大系统理论、灰色系统理论、模糊系统理论等)和信息学。

三、系统技术

系统技术是系统科学中的实用领域,包括系统工程学、控制技术和信息技术。这里,我们主要介绍系统工程学。

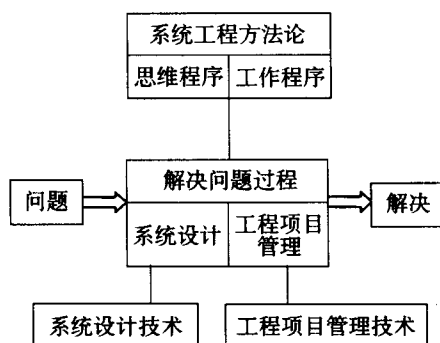


图 2—8 系统工程基本结构

系统工程学是由系统方法、运筹学和电子计算机技术组成。系统方法为系统工程提供思考方式和若干系统方法理论,运筹学提供数学化的一套系统技法,电子计算机技术提供“计算”技术与手段。这三者在应用于解决具体系统问题时就形成各项系统工程。

系统的结构如图 2—8 所示^①。其中,系统工程的总过程是一个解决问题的过程;一些复杂问题是它的出发点,而这些问题的解决乃是其终点;它包括系统设计和工程项目管理。

1. 系统工程方法论

系统工程方法论是整个系统工程的指导方针,是把系统方法应用于解决复杂系统问题时形成的指导程序;它包括思维程序和工作程序。

工作程序表示解决问题过程在时间上的先后次序、由粗到细的解决问题次序,它要求先大致确定整个系统的总目标和解决问题方案的初步范围,然后在拟定解决问题设想的过程中使它们逐步具体化。工作程序分成三个过程:系统开发过程,包含预备研究、主体研

^① 布歇尔(A. Büchel)等. 系统工程(上). 上海机械学院系统工程系, 1983. 6。这里,“系统工程”被表示为一个“人形”。我对原图做了一些改动。

究和详细研究三个阶段;系统实现过程,包含系统建立和系统试运行两个阶段;其余内容属于系统使用过程。

思维程序是一个可以在各工作程序中多次应用的行动指南,是具体解决问题过程的依据。思维程序可分为三个过程:目标研究过程,包括情况分析阶段和制订目标阶段;方案研究过程,包括综合阶段和分析阶段;方案选择过程,包括评价阶段和决策阶段。

2. 解决问题过程

解决问题过程包括系统设计和工程项目管理。

系统设计亦被称为狭义的解决问题过程,是设计新的解决问题方案的工作本身。在系统设计中优先考虑的是所要设计的对象系统及其环境。在系统设计中需要把通用的系统工程方法论加以具体化,并运用有关专业知识以及有关方法与技术。

工程项目管理是指对工程项目进行计划、监督、协调、调度等的工作。在工程项目管理中要给参加工程项目的人员或小组分配任务、职权和责任,确定这些人员或小组的组织关系,理顺决策过程,贯彻已被采纳的决定等。主要有下列三项工作内容:对工程项目进行部署与调度;建立工程项目的组织机构;建立工程项目的管理信息系统。

3. 若干具体方法与技术

在系统设计和工程项目管理中不仅要利用系统工程方法论,而且要利用一系列的具体方法和技术。除了通常所说的运筹学和电子计算机技术外,还经常用到一些描述系统的方法与技术、信息获取技术和预测技术、制订目标的技术与方法、创造性技术、系统分析方法、评价/决策技术以及一些工程项目管理技术与方法等。

此外,如贝塔朗菲与钱学森所指出,包括电子计算机技术、通信技术、自动化技术等在内的各种系统控制技术和信息技术也属于系统科学的实用领域。

2.4 系统科学与其他科学的关系

从历史上看,系统科学是通过对当时已有的不同学科进行跨学科比较研究,或者对一些复杂系统进行多科学综合研究而产生的。从贝塔朗菲、维纳等人的工作中可以知道这一点。这样,我们可以从多个侧面上讨论系统科学与其他科学之间的关系。下面,我们仅从现代科学知识结构等级上,讨论系统科学与其他科学之间的关系、系统科学在现代科学知识结构等级中的地位以及系统学的若干特征。

2.4.1 科学知识结构等级的划分原则

科学知识是人类认识的结晶,同时又是不断深入的认识过程。科学知识作为一个总体系统包含着一系列子系统,而这些子系统排列的总和构成科学知识系统的结构。科学知识作为一个复杂大系统,它的结构具有等级性,因而就形成科学知识系统的结构等级。

科学知识的结构等级在历史上是以科学分类的方式进行的。这里首先要指出的是,划分科学知识结构等级的问题不是单纯的科学分类问题。在科学分类中首要的目的是对现存科学知识进行分门别类,而不同类型科学知识之间的内在联系问题并不是科学分类的直接目的。但是,划分科学知识的结构等级就不能回避不同类型科学知识之间的内在联系、它们的排列秩序,因为这里所研究的不只是不同类型科学知识之间的区别,而且是由它们构成的整个科学知识系统及其结构。尽管如此,在进行科学分类时,如果考虑不同类型科学知识之间的内在联系,那么科学分类就可以与科学知识结构等级的划分问题统一起来。

为划分科学知识结构等级,必须有某种分类原则或分类标准。历史上科学分类曾有过两种分类原则。

其一是以主观的认识能力作为分类的根据。培根(Francis Bacon, 1561—1626)和“百科全书派”把人类理性能力分为记忆、想象和理性,与此相应,科学知识被分为历史、诗歌(及艺术)、哲学。这一原则正确地看出了科学知识类型与人类认识能力有关。但是仅以人类认识能力作为科学分类的根据是不妥当的。这是因为:第一,人类认识能力的分类,是一个极其复杂的问题,而离开科学知识的类型,就无法先验地知道人类认识能力的类型;第二,在现实的人类认识过程中各种认识能力并非分立地发生作用,任一类型的科学知识都不是只由某一特定类型的认识能力决定的,而是由人类各种认识能力的综合效应决定的。

其二是以客观的认识对象作为分类的根据。圣西门(Comte de Saint-Simon, 1760—1825)、黑格尔和恩格斯的科学分类原则就是如此。其中,圣西门未能把握各种自然现象之间的内在联系,因而也就未能把握各门科学之间的内在联系。黑格尔客观辩证地把握了这些内在联系,但是在他看来这些联系不是基于客观的物质性对象,而是基于绝对精神的外化与运动。在以客观的认识对象作为分类根据的观点中,最合理的是恩格斯的理论。他指出:“每一门科学都是分析某一个别的运动形式或一系列互相关联和互相转化的运动形式的,因此,科学分类就是这些运动和形式本身依据其内部所固有的次序的分类和排列,而它的重要性也只是在这里。”^①这一分类原则正确地指出了科学知识的内容是对客观世界各种运动形式的反映,如像恩格斯所指出,各种运动“形式的反映,即各种不同的科学”^②。

但是这里有必要指出下列几点。第一,科学知识归根结底是对客观对象的反映,但是在反映过程中,反映的内容取决于被反映者(如客观的认识对象),而反映的形式取决于反映者(如具有一定认识

① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 227

② 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 228

能力的人脑),所以科学知识并不是客观实在本身,而是“移入人的头脑并在人的头脑中改造过的物质的东西”^①。因此科学分类不仅要考虑客观的认识对象,而且要考虑主观的认识能力。第二,在牛顿力学占统治地位的以往的几个世纪里,人们总是以为科学知识可以反映与人无关的纯粹的客观实在本身。但是 20 世纪的科学成就从根本上推翻了这种信条。人类为认识客观对象就必须观测客观对象,不管观测是直接依靠人的感觉器官进行还是借助观测仪器。那么观测者与客观对象之间有什么关系呢?相对论第一次把观测者引进物理系统,从中阐明由于观测者的相对速度或相对加速度不同而观测结果也不同。量子力学阐明了由于观测需要物质与能量的传递而导致被观测的客观对象不同于自然存在的客观对象,因而在科学上谈论与观测无关的纯粹的客观对象是没有意义的。也就是说,不仅科学知识受着人类认识能力的制约,而且科学知识所反映的不是客观实在本身,而是由于人的观测而已经起了变化的客观对象。不仅如此,控制论表明在控制论系统中,观测者已不是被动的反映者,而是能动的改造者,它不仅要根据客体的反应来调节自己的行为,并且要根据自己的目的去改造客体。这样,科学知识首先是人类在自己的实践活动中对已经和正在被人类改造的那些客观对象的反映。第三,科学知识是一个具有相对独立性的复合系统,把它还原为主观的认识能力或客观的认识对象都是片面的。

从上可知,为了科学地划分科学知识结构等级,我们既不能仅以主观的认识能力为根据,也不能仅以客观的认识对象为根据。于是我们需要一个新的分类原则,而这个原则的出发点在于科学知识是人的认识能力与认识对象之间的相互作用的产物,从而把科学知识当作一个系统,当作一个相对独立的复合系统。

① 马克思. 资本论(第 1 卷). 北京:人民出版社,1975. 24

科学知识是人脑对客观对象的反映,但它不是简单的机械的反映,而是抽象的反映即反映的抽象。列宁(Владимир Ильич Ленин, 1870—1924)指出:“当思维从具体的东西上升到抽象的东西时,它不是离开——如果它是正确的(注意)(而康德和所有的哲学家都在谈论正确的思维)——真理,而是接近真理。物质的抽象,自然规律的抽象,价值的抽象等等,一句话,那一切科学的(正确的、郑重的、不是荒唐的)抽象,都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。”^①这样,我们可以把科学知识按从具体到抽象的顺序排成一个序列,从而根据科学知识的抽象化程度(换言之,亦即它的具体化程度)划分科学知识系统结构等级。显然,据此分类原则,那些具有同一的或相似的抽象化程度的科学知识就归属于同一的结构等级。剩下的问题是如何划分一个等级内部不同类型科学知识的问题。我们认为同一等级内的科学知识就可以它们的研究对象为根据予以区分。当然这里所说的研究对象已不是纯粹的客观对象,而是把我们在上面的讨论中所提出的各种思想包含在内的、属于认识系统中的客观对象。

总之,就整个科学知识系统而言,它的结构等级的划分要以所论科学知识的抽象化程度为基准,而就属于同一等级的科学知识而言,它们的分类则要以它们的研究对象为根据。

2.4.2 现代科学知识结构等级

从上可知,我们可以用所论科学知识的抽象化程度为基准去划分任一历史时代的科学知识结构等级。但是科学知识系统作为一个动态系统,遵循着系统科学的历时性原则,也就是说,科学知识结构不是一成不变的,而是随着人类认识的发展而发展的。因此我们必须从科学知识结构的历史发展中考察现代科学知识结构等级。

^① 列宁. 哲学笔记. 北京:人民出版社,1974. 181

在古希腊,一切科学知识都从属于哲学,尚未形成独立的自然科学或社会科学。在 16—17 世纪科学革命后,自然科学与哲学分离而宣告独立,并在第一次工业革命中产生了工程技术这一独立的知识体系。随着社会知识被确立为科学,到了 19 世纪,科学知识系统又把社会科学包括在内。于是科学知识构成为三层结构:(1)哲学、数学;(2)自然科学、社会科学;(3)工程技术。

在 20 世纪,一方面,由于基础科学(指自然科学、社会科学以及后来的思维科学)和工程技术的相互结合,从中产生了技术科学。所谓技术科学,是指所有的或多门工程技术所共有的基础理论体系,如能源科学、材料科学、工程设计、固体力学、电工学等。虽然技术科学这一术语早已出现于 19 世纪末,但是技术科学作为成熟的知识体系还是 20 世纪 50 年代的产物。另一方面,在(1)与(2)之间产生了系统科学。这也是 20 世纪中叶的产物。虽然对系统科学体系至今仍然众说纷纭,但它确实作为一门科学存在,这已是无可非议的了。这样,现代科学知识就构成为五层结构:①哲学、数学;②系统科学;③自然科学、社会科学、思维科学;④技术科学;⑤工程技术。

不言而喻,各结构等级的区别不是绝对的,而是相对的。各等级之间、同一等级内的不同科学之间存在着错综复杂的相互关系,从而整个科学知识构成一个网络系统,如图 2—9 所示。

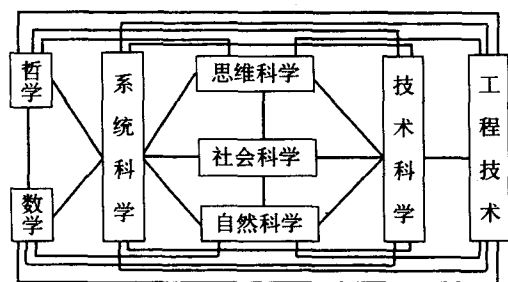


图 2—9 现代科学知识系统结构等级

从中可知:第一,科学知识的抽象化程度不同,其结构等级就不同;第二,每一等级的科学知识不仅与下一等级或上一等级的科学知识有联系,而且与其他所有等级的科学知识有联系;第三,上述的联系是相互的,即每一等级的科学知识不仅受着其他所有等级的作用,同时对其他所有等级发生作用;第四,在同一等级中,若研究对象不同,则构成不同的学科,如在③中,研究自然界运动规律的是自然科学,研究社会运动规律的是社会科学,研究思维活动规律的是思维科学;第五,每一等级的科学知识通过进一步的抽象化或具体化可以过渡到另一等级,例如对系统科学的进一步抽象化,就可上升到哲学或数学,而对作为“一般科学”的系统科学的进一步具体化(凭借具体研究对象),就可“下凡”为“具体科学”(指自然科学、社会科学与思维科学)。当这里的具体研究对象为自然现象时,就过渡到自然科学;当这里的具体研究对象为社会现象或思维问题时,就过渡到社会科学或思维科学。

2.4.3 数学、哲学、系统学之间的关系

从图 2—9 可以看出,数学、哲学、系统学之间的关系十分密切。这三者之间的关系究竟如何,是需要认真研究的。

先看哲学与数学之间的关系。在以上的讨论中,我把数学与哲学放在同一个结构等级中。但是数学在科学知识结构等级中的地位问题,至今仍有许多不同见解。如,有人把数学归入于基础自然科学,有人把数学和自然科学、社会科学放在同一等级。我之所以把数学与哲学放在同一等级,是根据如下几点的:

第一,数学与哲学有着相似的抽象化程度。数学是研究量(包括数和形,亦即数学结构)的科学,是“一种研究思想事物(虽然它们是现实的摹写)的抽象的科学”^①,即是说,数学的研究对象是作为思想

① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 192

事物的量。相仿地,哲学是另“一种研究思想事物(虽然它们是现实的摹写)的抽象的科学”,而它所研究的思想事物不是数和形,而是抽象的纯粹概念。诚然,哲学为人们提供关于世界的总的观点,但它不是用具体的科学语言,而是用抽象概念来研究世界。例如,“物质”也许是哲学最重要的研究对象之一,但是“物质本身是纯粹的思想创造物和纯粹的抽象”^①。可见,将数学与哲学放在同一等级是合理的。从某种意义上可以说,古希腊柏拉图学院门口上“不懂几何者不得入内”的标语已经为后来许许多多的哲学家为什么不够格做出了最好的诠释。

第二,数学与哲学的同等级性表现在它们与具体科学的关系的相似性上。一方面,具体科学总是需要哲学上的解释,相仿地,具体科学总是需要用数学表达式表示出来。完满的哲学解释,明确的数学表达式,与经验事实的相符合,这是每一门成熟的具体科学必须具备的三大指标。另一方面,数学与哲学以十分相似的有效性为具体科学的发展开辟道路。具体科学总是受着哲学的支配或影响,又不能没有数学工具,这已是众所周知的常识。不仅如此,正确的哲学思想和数学式子在许多场合下甚至走在具体科学的前面,成为具体科学发展的牵引力,指出具体科学发展的方向。例如,普朗克曾利用内插法由维恩(Wilhelm Wien, 1864—1928)的位移定律和瑞利(John William Strutt Rayleigh, 1842—1919) - 金斯(James Hopwood Jeans, 1877—1946)辐射公式推导出黑体辐射分布定律,从而提出了作用量子概念,尽管他本人对自己的发现不甚理解。而我们知道,黑格尔和恩格斯早已从哲学上正确地把握了客观世界的连续性和间断性问题。又如,能量守恒定律的发现首先应归功于哲学,其次才是自然科学的自豪,而夸克的存在首先是从数学式子中推导出来的。恩

① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 233

格斯曾经指出:“在涉及概念的地方,辩证的思维至少可以和数学计算一样地得到有效的结果。”^①

第三,数学与哲学的关系同它们与具体科学的关系之间存在着本质的差别。数学与哲学以不同的方式反映世界,数学从存在的量的侧面解释世界,而哲学主要从存在的质的侧面解释世界,它们各自有自己的长处和短处。但由于客观世界是质与量的统一,数学和哲学的关系本质上是直接的,从而是十分密切的。哲学为克服自己的局限性,时常求助于数学,而数学也不得不从哲学那里借来概念用于构造它的体系,这在集合论、群论中特别明显。但是哲学之用于数学并不需要具体化,只需要扬弃它的质,过渡到量;同样地,数学之用于哲学也不需要抽象化,而只需要扬弃它的量,过渡到质。相比之下,数学与哲学同具体科学的关系不是直接的,而是间接的,也就是说需要中介的。为从具体科学中引伸出哲学结论,需要一个抽象化过程;那些把具体科学的结论不经抽象而直接塞进哲学的作法,不过是一种儿戏,是特别令人厌恶的。哲学之用于具体科学,则需要一个具体化过程;那些用哲学结论来取代具体科学的愿望,不过是一种奢望,是特别有害于具体科学的发展的。数学与具体科学之间也存在着与此类似的关系。

从上可见,就抽象化程度而言,数学和哲学处于同一结构等级。但是它们之间还存在着原则区别。首先,哲学抽象的内容和普遍性大于数学抽象的内容和普遍性。这是因为哲学所反映的是对客观存在全体的抽象,尽管它主要研究的是存在的质的侧面,但它不能不研究存在的量的侧面。这在哲学辩证法的量变质变规律中表现得十分明朗。与此不同,数学所研究的只是客观存在的量的侧面,而当我们把数学规定为关于存在的量的科学时,所谓“量”的概念也是从哲学

^① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 70

上给以定义的。所以哲学虽然不能代替数学,但它包含着数学。第二,哲学的研究对象主要是存在的质的侧面,而质是存在的内在规定性,所以哲学可以从本质上反映客观存在。但是数学的研究对象是存在的量的侧面,而量是存在的外在规定性,所以数学只能从量上描绘客观存在。第三,哲学是关于世界观的学问,是关于自然、社会和思维的最普遍最基本的规律的学问,而数学只不过是“辩证的辅助工具和表现方式”^①。

自从 16—17 世纪科学革命以来,在相当长的一个时期里,科学知识发展的趋势一方面是数学同具体科学的结合,另一方面是哲学同数学与具体科学的分离。从 19 世纪后半叶起,特别是进入 20 世纪后则出现了哲学与具体科学结成联盟的新趋势。从 20 世纪中期起,已经出现和正在发展又一新趋势,那就是哲学和数学日益密切结合的趋势,也就是数学的“哲学化”与哲学的“数学化”,而系统学不仅是推动这一趋势的强有力的催化剂,而且它本身又是这一趋势的直接产物。

我们再来简单地讨论一下系统学的地位问题。从图 2—9 可知,系统学同哲学和数学有着三角关系,它介于哲学、数学与具体科学之间。系统学不仅是其他科学日益“哲学化”的产物,同时又是这些具体科学日益“数学化”的产物。当然,如同这里所说的“数学化”不是指这些具体科学变成了数学,而是指这些具体科学的理论可以和需要用数学形式表示一样,这里所说的“哲学化”也不是指这些具体科学变成了哲学,而仅仅是指这些具体科学越来越依赖于带有普遍性的哲学结论。系统学研究适用于各类具体系统的一般原则和规律。它不仅从哲学和具体科学中借用一些概念,而且提出一些特有范畴,从而形成自己的范畴体系,并力图用数学表示系统概念、系统原则与

① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 30

系统规律。系统学不像哲学或数学那样研究纯粹的思想事物,也不像哲学那样回答世界观问题。但是它的抽象化程度高于具体科学。它把握了从各门具体科学中抽象出来的一般特征。所以它时常被称为“横断科学”或“统一科学”。这些用语未必明确表示了系统学区别于具体科学的本质特征,但已经反映了系统学的抽象化程度高于具体科学。所以我认为系统学是介于哲学、数学与具体科学之间的、具有跨学科性质的一般科学理论。

2.4.4 系统学的特征

根据以上的讨论,我们可以从下列几个方面考察系统学的特征。

一、可否证性

波普尔(Karl Raimund Popper, 1902—1994)曾经说道:如果把各种思想和假说比作悬浮在液体中的粒子,可检验的科学就是这些粒子在容器中的沉淀物。这些粒子是分层沉淀的,每一新沉淀下来的层相当于比它底下的那些理论更普遍的理论。结果,原先在高处的“形而上学”区漂浮的思想有时可因科学的成长而与科学接触后沉淀。然而,这些思想只有以可否证的形式出现时,才能取得科学的地位。^①

那么,什么是否证、可否证、不可否证呢?

否证是一种演绎推理,叫否定后件的推理。其一般形式为:

$$\begin{array}{ll} \text{前提 1} & P \supset Q \\ \text{前提 2} & \sim Q \\ \hline \text{结论} & \therefore \sim P \end{array}$$

其中, $\supset$ 表示“如……则”, $\sim$ 表示“非”。显然,这种推理得出的结论具有必然性。例如,如“凡乌鸦皆黑”(P),则“乌鸦*t*亦黑”(Q);

① 邱仁宗. 科学方法和科学动力学. 北京: 知识出版社, 1984. 42

“乌鸦 t 非黑”($\sim Q$),因此“凡乌鸦皆黑”为假($\sim P$)。

可否证是指在逻辑上可以用经验来证明为假。例如,“明天这里下雨”这一陈述是可以否证的。但是,“明天这里下雨或不下雨”这一陈述是不可否证的。重言式的或模棱两可式的命题都是不可否证的。

一个理论的可否证性是指从该理论推导出的结论(解释、预见)在逻辑上或原则上有可能与一个或一组观察陈述发生抵触。凡可以否证的,是科学的;凡不可否证的,是非科学的(包括不科学的、假科学的)。

在波普尔看来,一切经验科学,如物理学、化学、天文学、地质学、生物学、医学等,都具有可否证性,而数学、哲学、占星术、理性宗教等都不具有可否证性。

我认为,系统学属于波普尔意义下的经验科学,并与其他经验科学(如物理学、经济学、心理学等)有着密切的直接联系,因此它具有可否证性。在这一点上,系统学不同于哲学与数学,而与经验科学相同。当然,在当前水平上,系统学还保留着一些“形而上学”的东西,这就需要通过认真的研究使它们“沉淀”为科学的原理。

二、抽象性

凡科学知识都具有抽象性,但是如图 2—9 所示,不同层次上的科学具有不同的抽象程度。系统学是对自然科学、社会科学和技术科学进行综合,对各种系统的同型性进行科学抽象而形成的。因此,系统学的抽象性虽不及哲学和数学,但强于其他经验科学;与其他经验科学相比,系统学同哲学和数学的联系更为密切。

三、跨学科性

从宏观上考察科学发展史,就可以知道科学的发展是分化与合化的对立统一过程。

科学发展中的分化趋势是非常明显的。在古希腊,一切科学都

隶属于哲学,哲学则是包罗万象的科学。古希腊的哲学家是万能科学家,其中亚里士多德是最典型的人物。在文艺复兴时期,一个人还可以成为通才型的科学家。例如,达·芬奇既是科学家,又是艺术家,不仅研究了天文学、地理学、建筑学、造船术、机械学、植物学、航空学等,还留下了像“最后的晚餐”这样的不朽之作。

但是,近代科学几乎从根基上消除了出现这种万能学者的可能性。与近代科学相适应的主要思维方式是分析。统一的自然界被分为各独立领域,越分越细,越分越多,科学的分化似乎是按指数规律进行的。科学的加速分化,不仅是近代科学发展的重要标志之一,又是近代科学发展的一个强大推动力。从某种意义上甚至可以说近代科学的发展史就是各门学科、各门专业的分化史。于是,即使是那些最杰出的人物也只能是一两门或几门专业或学科中的专家。例如,牛顿在他那个时代是一个最有天才的人,但也只在数学和物理学中做出了贡献,而在艺术和工程技术领域没有做出什么贡献。

到了20世纪,科学的分化已达到前一个世纪的人所不可想象的程度。据有人统计,现在物理学和化学约有1800个学科,数学有1700个学科,工程学有1850个学科,而且分化趋势继续发展。维纳说得很好:“今天,没有几个学者能够不加任何限制而自称为数学家,或者物理学家,或者生物学家。一个人可以是拓扑学家,或者是声学家,或者是昆虫学家。”^①

但是,分化只是科学发展的趋势之一,而分化本身又为合化创造了条件,提供了可能性。分化建立了许多独立学科,而随着分化的加剧,学科和学科之间的无人区的数目也急剧增多起来。从19世纪后半叶起,这些无人区开始被一些人占领。各门独立学科相互渗透,相

① 维纳. 控制论. 北京:科学出版社,1963. 2

互交织,相互结合,结果产生出所谓边缘学科。这些新学科往往用所连两门学科的复合词来称呼。例如,原有的物理学、化学、生物学、天文学、地学相互结合而产生了物理化学、生物力学、生物物理、生物化学、地球物理、地球化学、地质力学、天体生物学、天体物理、天体化学、天体力学、天体地质学等。尤其是由于 20 世纪 20 年代产生量子力学,物理学由传统的只研究物质运动的学科发展成既研究物质运动又研究物质结构的学科。这样,30 年代出现的量子化学被视为应用物理的一个分支,并且除生物学以外的、所有研究无生命界客观规律的学问统一成为物理科学。不仅如此,物理科学与生物科学之间的关系也变得日益密切。

另一方面,我们又看到合化趋势的另一种方式。那就是在系统科学领域中出现的各种跨学科的学科。这里所出现的并不是两门或多门传统学科的相互结合,而是完全崭新的学科。它们一方面抽象出各种传统学科规律之间的同型性,即各种传统学科领域之间的同型性,另一方面又抽象出不同层次系统之间的同型性。这样,系统学具有跨学科的性质。在这一点上,系统学截然不同于以往的各种边缘学科,尽管它们都是科学发展的合化趋势的产物。

四、数理性

系统学与它上一层次的哲学和数学,与它下一层次的自然科学、社会科学和思维科学有十分密切的关系。在系统学研究中,许多概念或者直接取自这些相邻科学知识领域并被赋予新的意义,或者用某种方式创造。所以,在叙述方式上,系统学自然会受到这些相邻科学知识叙述方式的影响。但是,总的来说,系统学在叙述方式上同数学、自然科学等所谓“精密”科学的关系要比同哲学、社会科学等学问的关系更加密切。所以,在发达的形式上,系统学的叙述将具有很强的数理性。

2.5 系统学的研究方法

在系统学研究中,不仅要大量使用其他科学知识领域的研究方法,而且要使用自己特有的研究方法。就目前情况而言,下列几点对系统学研究是非常重要的。

2.5.1 数学方法与非数学方法的结合

数学方法在系统学研究中的重要性是不言而喻的。实际上,系统学自从它产生的时候起,就把一些经验科学的数学化当作自己的具体目标之一,并在这方面已取得了可喜的成果。但是,这并不是说,数学方法是系统学研究和描述的唯一重要的方法。科学的进步不仅表现为有效的数学描述能力的提高,而且表现为有效的语义描述能力的提高。数学描述需要用语义描述来补充,而语义描述需要用数学描述来形式化。

因此,在系统学研究中,数学方法与非数学方法是互补的。正如贝塔朗非所指出:“一般系统理论终究是一门‘关于整体性的逻辑和数学的科学’,而它的精确展开则是‘技术上的’即数学上的事情。但‘语言’的描述和模型是不可取消的。在能够把问题加以形式化之前,需要直观地‘看到’并认识这些问题。否则,数学形式主义毋宁将会阻碍‘实际’问题的探索。”^①

2.5.2 定性方法与定量方法的结合

在科学研究中,定性研究通常是定量研究的前提,定量研究则是定性研究的精确化。如无科学的定性研究,就不可能有科学的定量

① Bertalanffy L. v. *General System Theory*, 1968. 256

研究。但这并不意味着在每一具体情况下,定性研究一定居于定量研究之前,定量研究一定居于定性研究之后。一般来讲,定性研究和定量研究互相补充,相得益彰。

因此,只重视定量研究或只重视定性研究的作法都是不可取的。尤其在系统学中,因为所研究的主要是复杂系统,特别是包括人的因素在内的复杂系统,如心理现象、社会系统、管理系统等,其中往往包含着在目前的数学水平上无法或难以量化的因素,所以应当而且只能把定性研究和定量研究结合起来。

此外,还有必要指出下列两点:

其一,定量研究如不与科学的定性研究相结合,有可能出现普朗克悲剧。如众所周知,普朗克曾经引入了普朗克常数 h ,但他长期弄不清楚常数 h 是一个单纯的数学技巧的产物还是有深刻意义的物理量。

其二,定性描述和定量描述常被误解为非数学描述和数学描述。显然,非数学描述通常是定性描述,但是数学描述并非就是定量描述。例如,动力系统理论主要通过数学上的定性方法来研究动力系统的进化过程。

2.5.3 实验方法与科学抽象的结合

系统学要同其他理论科学一样,广泛使用各种科学抽象方法,从大量数据、资料和现象中抽象出科学结论。由于系统学具有高度抽象性,科学抽象在系统学研究中尤为重要。

实验方法在系统学研究中的作用也不能低估。要广泛进行物理实验、生物实验、心理实验和社会实验等,还要重视各种模型实验。特别需要强调的是电子计算机上的实验。在大量复杂系统研究中,由于所要处理的数据量庞大,大量非线性方程无法求解,而分形图形又处处不可微,所以如不借助电子计算机进行数值分析和模拟就寸

步难行。

2.5.4 传统方法与系统方法的结合

在系统学研究中各种传统方法仍然起着重要作用,但是最重要的还是系统方法。

从逻辑上讲,系统方法是系统学理论的方法论功能的表现,是用系统学的观点、原理和规律去研究和解决各种系统问题的一整套模式。但是这并不是说,只有在完成系统学研究之后才能有系统方法。从系统学的历史看,最先出现的是哲学上的系统观点,其次是系统方法在工程技术领域中的出现和应用,再次才是系统学理论的探讨。在实际研究中系统学理论和系统方法是相辅相成的。只有在成功地应用系统方法时,系统学才能有大的进展,而系统方法的发展又依赖于系统学的发展。

当然,在系统学研究中,系统方法并不是惟一有效的方法,不能用系统方法来代替或排除传统方法,应当把传统方法和系统方法有机地结合起来,而各种传统方法只有在与系统方法的结合中才能为系统学研究做出贡献。

第三章 系统概念

从本章起,将讨论系统学的基本内容。不言而喻,“系统”是系统学最基本的概念,“系统”定义应该成为系统学的逻辑起点。为此,给出能使系统学的逻辑展开成为可能的“系统”定义就成为系统学研究的首要任务。

在本章中,我将先讨论在目前的系统研究中有广泛影响的多种系统定义,然后讨论与系统定义有关的一系列概念,如要素与环境、结构与功能、子系统与分系统等,并讨论它们之间的关系。

3.1 什么是系统

在系统学中,“系统”是一个最基本的概念。虽然不能说没有明确的系统定义,系统学研究就无法进行,也不能说没有明确的系统定义,系统学就不能发展,但是系统学的研究不能回避对系统的定义问题,没有对系统概念的基本理解,也就不可能深入研究系统学的许多基本问题。

系统学中的“系统”一词是英文词“system”的译语。在英文中system一词原来是一个极为平凡的词。作为日常用语,system一词在中文中有许多解释,如组织、机构、系统、体系、制度、体制、方式、装置等。当它还是一个日常用语时,人们并不需要讨论其确切含义。但是当它成为一个科学术语时,人们就无法不考虑如何较严格地定

义这个概念。

3.1.1 各种系统定义

在尚未出现系统理论的时候,人们已经知道太阳系、力学系、消化系统、生物系统等具体系统。这时人们所谈论的只是系统的某些具体存在方式,而不是抽象系统。他们知道自己所研究的是某种系统,但未必知道什么是系统,如同天天用散文说话的人未必知道什么是散文一样。

随着系统学的产生和发展,人们试图科学地定义系统概念。实际上,如果我们翻开有关系统问题的著作,就不难发现几乎每个人都宣布自己的系统定义。这本身不仅表明系统学还是一门年轻的科学,而且表明科学地定义系统确实不是一件容易的事情。人们通常根据研究的不同出发点、不同目的、不同角度或不同方式,给出不同的系统定义。

如果从系统的定义方式上看,现今的各种系统定义大致上可分为三组^①:一是把系统看作是数学模型的某一类,二是通过“元素”、“关系”、“联系”、“整体”、“整体性”这些概念给出的系统定义,三是借助“输入”、“输出”、“信息加工”、“管理”这些概念给出的系统定义。

从其内涵上考察现今各种系统定义,根据乌约莫夫(Авенир Иванович Уемов, 1928—)的研究,可将它们分为下列四种^②。在下面的叙述中,我们预先设定:

a : 表示不确定的对象,它相当于黑格尔哲学语言中的“纯有”,但不是无。

① 萨多夫斯基 瓦尼. 一般系统论原理. 北京:人民出版社,1984. 108

② 乌约莫夫 А И. 系统方式和一般系统论. 长春:吉林人民出版社,1983. 101—124. 在下面的叙述中,我根据自己的理解,对有些译文做了一些调整。

t :表示确定的对象,它相当于黑格尔哲学语言中的“实有”,是“规定了有”。

A :表示任意的对象,即可以把我们要讨论的任何一个事物当作 A 。

ι :称为依奥塔算子,前面有 ι 符号的对象,称为该对象的具体者。

此外,在下面的表述中,将性质记在带有事物标记的括号的右边,将关系记在带有事物标记的括号的左边。

这样,可将现今的各种系统定义分为下列四种:

$$\text{一、}\{(JA)\text{系统}\} =_{\text{def}} \{\iota A\} \quad (2.1)$$

此式表示,每个客体都可看作诸客体的子集。这就是说,按此定义,每个客体都是系统。例如:

(1) 梅萨洛维克认为:所谓抽象系统,是集合 X 的真子集 X_s ,即 $X_s \subset X$,或者说在集合 $X = X_1 \times X_2 \times \cdots \times X_n$ 上定义的关系 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_j\}$ 。

在这个定义中,没有规定加在关系上的任何限制。任何在集合 X 上定义的关系都是系统。因此,照此定义,无法区分系统与非系统。

(2) M. 托达与 E. 舒福德认为:“从最广义上说,所有可以被看作是个别本质的东西都可以成为系统……。可分解的系统是这样的系统,对它来说,存在着可以把它分解为部分或子系统的手段”。

第一句话把每个独立存在的东西都看成系统,而第二句话所定义的只是可分解的系统。

(3) 扎德(Lotfi Askar Zadeh, 1921—)和德佐耶尔认为:“抽象系统或系统 S 是作为 S 的诸组元的抽象客体 $A_1, A_2, A_3, \dots$ 局部地联结在一起的集合。系统 S 的诸组元可以是定向的或非定向的;其数目可以是有限的或无限的;其中每一组元可以由有限数目的

基本变量或无限数目的基本变量来规定。”

这里,从定义上看,不存在组元与系统之间的区别,因而任一对象都被看作是系统。

二、 $\{(JA)系统\} =_{def} \{a(tA)\}$ (2.2)

此式表示,系统是有相互关系的诸客体的集合;或者说由某种关系系统一起来的诸客体的集合。这定义表示构成系统的诸客体之间必须有某种关系,但是没有指出这些关系应当满足什么要求。例如:

(4) 霍尔(A. Hall)和 R. 费真把系统定义为“客体、客体和客体之间的关系、客体的诸性质之间的关系的集合”。

实际上,客体概念非常广泛,它包括性质,也包括所谓抽象客体,所以这个定义只是用一些不确定的客体来规定了系统。

(5) 克里尔写道:“系统 S 是从一定分析层次上考察的诸量的给定集合。从形式上说,系统 S 是既包括外部值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 又包括时间参量 t 的诸值在内的给定的集合;所有这些值都在 $L = \{X_1, X_2, \dots, X_n, T\}$ 的分析层次上被考察。由此, $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n, t, X_1, X_2, \dots, X_n, T\} = \{X, t, L\}$ 。”

这个定义对于要素之间的关系没有加上任何限制。另一方面,将时间参量作为系统定义的必要内容也是不妥当的。

三、 $\{(JA)系统\} =_{def} \{t[(tA)a]\}$ (2.3)

这定义表示,某个随意选取的客体,如果它的各性质之间有确定的固定关系,那么它就是一个系统。例如:

(6) 艾什比(William Ross Ashby, 1903—1972)把系统定义为“观察者从实在的‘机器’所固有的变量中选取的诸变量的任何总和”。

这里,每一个客体都具有一种不确定的性质,但是这些性质由特定关系联系在一起,从而构成一个系统。但是,用“机器”概念来定义系统,却不甚妥当。

(7) 切里(K. Cheri)认为:“系统是由许多部分组成的整体,是诸特征的总体。”

这里,诸特征由一定的关系联结而构成一个总体即系统。

(8) 拉波波特从数学上定义系统:“从数学角度看,系统是世界的某一部分,把具体意义赋予某变量集,就可在任意给定时间里描述这一部分。”

这里,变量集被某个方程联系起来,这个方程表示形成系统的关系,而具有这种性质的对象就被视为系统。

(9) 帕斯科(G. Pascoe)认为“被某个观察者看成是合乎规律的、电路中电源的任何分配形式就是系统”。

这显然是第三种系统定义的一个具体形式。

四、 $\{(JA) \text{ 系统} \} =_{\text{def}} \{[a(tA)]t\}$ (2.4)

这定义表示,某个随意选取的客体,如果其中存在着某种具有确定的固定性质的关系,那么它就是一个系统。属于这一种类的系统定义很多,例如:

(10) 韦伯斯特(Webster)词典中把系统定义为:“系统是一个复杂的统一体,它通常是由许多不同的因素表述的,并具有总的计划,或者用于达到一个总的目标。”

这里,认为系统应当具有总的计划,或者用来达到总的目标。这就是特定的性质 t 。系统的目标或计划是由因素间的关系所固有的,而因素本身是具有性质 t 的关系所赖以实现的东西。

(11) 韦伯斯特词典中还有两个定义:“系统是由有规则的相互作用或相互依赖联结在一起的诸客体的汇集或结合;”系统是“有序地活动的整体、总体”。

这两个定义的结构与前者相一致。

(12) 伯格曼(G. Bergman)写道:“目前只要把系统看作是有限空间中的一组物理客体,就足够了。该组在对之可做出评价的时间

期限之内是同一的。”

这里被定义的不是一般系统,而是由物理客体构成的系统。但是该定义的结构表示,如果诸客体互相处于一种可在一定时间内维持的关系中,它们就形成系统。

(13) 贝塔朗非认为:“系统可定义为相互作用的各要素的复合体。”

这里,如果相互作用被看作是某类型的关系,那么使相互作用不同于其他一切关系的某些性质也就被规定了。

(14) 布思(T. Booth)写道:“系统理论由这样一个设想出发:任何一个物理装置的外部行为都可用一个相应的数学模型来描述,这个数学模型认定对这个装置的操作有影响的所有临界性质都是同一的。这样得到的数学模型叫做系统。”

这里, t 表示“可用数学描述”这个性质。但是把系统与数学模型等同起来是不妥当的。

(15) 迪斯特法诺(J. J. Distefano)等人把系统定义为:“系统是彼此之间相互联系和相互关联的各种实物的排列、集合或汇集,其相互联系和相互关联的方式使它们组成为某种统一体和整体。”

这一定义实质上同上述出自韦伯斯特词典的第三个定义相一致。

(16) 德列尼科认为:“在现代语言中,系统是一个装置,它接收一个或多个输入,并产生一个或多个输出。”

这是一个来自控制论的系统定义。这里,能把输入和输出区分开来的性质规定为 t ,而输入与输出之间是有某种关系的。但是,由于“输入”和“输出”概念有时难以确定,该定义会产生对同一个对象的不同理解。例如,对正在发生物理过程的系统来说,较容易规定其输入与输出,但是像桌子或椅子之类的物理客体,就很难规定其输入和输出。

(17) 艾里斯(D. Ellis)和路德维希(F. Ludwig)写道:“系统是按某种指令进行工作的装置、过程或方案;系统的功能在于按时间程序运用信息和(或)能量和(或)物质,来产生信息和(或)能量和(或)物质。”

这里,形成系统的关系所应满足的确定性是明确的。也就是说,系统的目标和为达到目标而使用的手段是明确的。

(18) 吉布森(R. Gibson)指出:“系统是相互作用的诸要素的综合整体,其使命在于以协作方式完成预先给定的功能。”

这里,“预先给定的功能”表示该客体的确定的性质,而诸要素之间存在着可用来完成系统功能的“相互作用”。

(19) 克希纳(R. Kicnner)写道:“系统是本质或实物,有生命或无生命物体的集合体,它接受某种输入并根据输入产生某些输出,而其目的则在于使特定的输入和输出功能得到最佳的发挥。”

这也是控制论中的系统定义,与定义(16)相一致。

(20) 克里尔和瓦拉赫(M. Wallach)的定义:“设系统 S 包括元素 $a_1, a_2, \dots, a_n$, 设 a_0 为系统 S 的周围环境。已知集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 和集合 $B = \{a_0, a_1, \dots, a_n\}$ 。集合 B 的每一元素都代表输入值的某种集合和输出值的某种集合。符号 r_{ij} 表示元素 a_j 的输入值对元素 a_i 的输出值的依赖方式,这种方式是由这些值之间的关系决定的。用 R 来表示全部 $r_{ij} (i, j = 0, 1, \dots, n)$ 的集合。在这些假定的情况下,系统决定于如下判断:每一个集合 $S = \{A, R\}$ 都组成为一个系统。”此定义与定义(16)、(19)没有实质区别。

(21) 梅萨洛维克给出抽象系统的隐定义(句法定义):“抽象系统是:(i)隐含确定的诸形式客体的某种集合。(ii)基本变换 T 的某种集合。(iii)由元素 T 组成的序列的诸形成规则 P 的某种集合。(iv)规定形式客体起始样式的诸命题的某种集合;这些命题被用来构成新的派生的客体。”

显然,在这个定义中,所定义的集合包含着某种预先确定的性质的关系。

(22) J. G. 米勒把系统定义为:“系统是在空间和时间上有限的领域,在其中诸组元是由功能关系联结在一起的。”

(23) S. 辛古普塔和阿科夫写道:“我们把系统看作是在时间和空间上由采取对策和评价行为的各种实际任务,即管理任务的集合联结起来的行动(功能)的集合。”

这里,规定系统形成关系类型的确定性限制着对象域。

(24) 威尔逊(A. Wilson)和威尔逊(M. Wilson)给出两种系统定义:“‘系统’一词最低限度可用来表示两个不同的概念:(i)由相互联系的并作为一个整体起作用的诸元素或部分组成的有规律的或有序的装置;(ii)由为完成某种操作而必需的诸元素(部分)所组成的总和或群体。”

这两个定义的差别在于确定性 t 的区别。

(25) G. 克律贝写道:“我们把系统定义为诸元素的非空集(至少包括两个元素),而且这一非空集的诸元素之间有一定的关系和联系。”

这里,诸元素之间关系或联系是确定的,因而就有 t 。

(26) B. H. 贝尔纳德斯基写道:“系统是相互作用的不同功能单元(生物的、人的、机器的、信息的、自然的单元)的总和,这一总和同环境相联系,并通过对材料、能量、生物现象的作用和控制来达到某个总的目标。”

(27) 朗格(O. Lauge)的定义:“系统是相互联系而起作用的诸元素的集合。”

(28) B. C. 丘赫金的定义:“系统是具有这种或那种性质的彼此之间相互联系的诸组元的集合,这种集合是这些组元按具有完全确定性质的关系有序地排列而成的;这一集合的特点是具有统一性,

而这种统一性表现在集合的整体性质和功能上。”

(29) A. D. 乌尔苏尔的定义：“系统是集合的诸组元的多种多样的关系和联系，它们组成为一个整体”，“可以把系统理解为组成为完整统一体的有组织的集合”。

(30) P. K. 阿诺兴的定义：“只能把经过选择而采用的诸成份的这样一种综合体称之为系统，在这种综合体中，相互作用和相互关系具有诸组元为获得既定的有益结果而相互作用的性质。”

(31) L. A. 布留门菲尔德的定义：“系统是用任何一种方法从其他周界中分离出来的实在元素或想象元素的总和。这种总和成为系统，需有以下条件：(i)这些元素之间存在着一定联系；(ii)每一元素从自身内部来说被看作是不可分解的；(iii)系统作为一个整体而与系统之外的周界发生相互作用；(iv)如果在总和的诸元素之间在各个不同时刻可以找出单值对应，那么在随时间演变的情况下这一总和就可以被看作是系统。这种对应应当正好是单值对应，而不是一一对应，……时间上的有序性并不是必不可少的特征；如有离散情况，那么则可以把它们都看作是一个系统，在系统中还可分离出子系统。”

(32) I. V. 勃劳别尔格等认为，从系统的整体性出发，可以通过下列特征对系统概念下定义：(i)系统是由相互联系的诸元素组成的整体性综合体；(ii)系统与环境组成特殊的统一体；(iii)任何所研究的系统通常都是更高一级系统的元素；(iv)任何所研究的系统的元素通常又都是更低一级的系统。

显然，除了上面列举的 30 多个系统定义外，我们还能列举更多的系统定义。但是，从系统定义的逻辑结构上看，现今的各种系统定义似乎都可以归类于上述四种程式之一。

这里，从以上的讨论中，我们可以知道：

1. 程式(2.1)表示任一客体都是系统，而程式(2.2)表示形成系统的客体之间必须有某种关系，但是没有规定应当是什么样的关系。

我们无法根据这两种程式区分系统和非系统,或者说,在这两种程式中系统概念只是客体概念的另一种说法。

但是,程式(2.3)和程式(2.4)明确地规定了系统概念的内涵。在程式(2.3)中,明确地规定了系统赖以形成的性质,而系统中存在的关系应当适合这个性质。在程式(2.4)中,明确地规定了形成系统的关系,而表征系统特性的性质应当处在该关系中。

2. 在程式(2.4)中, t 并不表示具体的确定性质,只是表示确定性这个性质本身。因此,作为该程式的例子提供的大量系统定义都是满足这个程式的。在这种意义下,该程式所表示的是“任一客体,其中发生某种满足确定性这个性质的关系,这客体就是系统”。

由于 $t \rightarrow (a)t$,即如果有一个确定的客体,它就可以被看作某个客体的性质,所以程式(2.4)亦可表述为“任一客体,其中发生某种预先确定的性质的关系,这客体就是系统”。

在上面列举的程式(2.4)的各种定义中就可知道,根据人们的研究目的或任务不同,人们所选取的确定性的具体内容就不同。

对于程式(2.3)也可以用同样的方法来讨论。惟一的区别是在程式(2.3)中,确定性不是性质,而是关系。也就是说,程式(2.3)可表述为“任一客体,其中有某些处于某种预先给定的关系中的性质,这客体就是系统”。

3. 就程式(2.3)和程式(2.4)的关系而言,在这两种程式中,“关系”与“性质”之间存在着对偶变换关系。例如在射影几何学中,有这样一个命题:两条直线决定一点。如果同时用“直线”代替“点”,用“点”代替“直线”,就得到一个新的真命题:两点决定一条直线。在程式(2.3)和(2.4)中,如果同时把“性质”换成“关系”,把“关系”换成“性质”,那么程式(2.3)就转换成程式(2.4),而程式(2.4)就转换成程式(2.3)。也就是,程式(2.3)和程式(2.4)是等价的。

4. 上面列举的 30 多个系统定义,就其本身而言,都不是“系统”

概念的一般定义即一般系统的定义。实际上,这些定义的作者们大都并不追求为“系统”概念给出真正一般的定义。他们有自己的特定的研究目的。他们所追求的通常是与他们的研究目的相吻合的系统定义。在程式(2.3)和程式(2.4)中列举的许多系统定义对于其特定适应范围而言都是合理的,但是因为它们不是一般系统定义,所以在其他具体情况下它们是否合理,是否可用,那只能在每个具体情况下重新考虑。

3.1.2 系统、要素、环境

一、系统与要素

上面已经看到,程式(2.3)和程式(2.4)给出了正确的系统定义。为了增强系统定义的可操作性,引入“要素”概念是必要的。也就是说,有必要用要素、性质、关系以及集合的概念来定义系统。这样,由程式(2.3)和程式(2.4)就可得到下列系统定义:

$$1. S =_{\text{def}} R[(E)P] \quad (2.5)$$

或者

$$2. S =_{\text{def}} [R(E)]P \quad (2.6)$$

其中, S 表示系统, R 表示关系, P 表示性质, E 表示要素 $e_1, e_2, \dots, e_n$ 的集合。

这里,所谓要素,是指系统的构成成份、被结合部分、组元或相互关联的因子。例如,从构成上看,原子核与电子是原子的要素,原子是分子的要素,细胞是多细胞生物体的要素;个人是社会的要素;词汇是句子的要素;等等。

此外,这里还约定:位于方括号之外的变量可以任意选取;位于方括号之内而在圆括号之外的变量要受制于方括号外部变量的规定性;位于圆括号内部的变量要受制于其他两个变量的规定性。

这样,(2.5)式表示,系统被定义为对于预先确定的关系(R)持

有某种性质(P)的诸要素的集合(E),即是说,系统是诸要素的集合(E),其中所考察的性质(P)处在诸要素之间的预先确定的关系(R)中。相仿,(2.6)式表示,所谓系统,是对于预先确定的性质(P)持有某种关系(R)的诸要素的集合(E),即是说,系统是诸要素的集合(E),其中诸要素之间存在着某种关系(R),而这种关系是对于预先确定的性质(P)而言的。

总之,系统可定义为对任意选定的某种性质具有特定关系的诸要素的集合体,或者对任意选定的某种关系具有特定性质的诸要素的集合体。

二、系统与边界

从经验上看,任何具体系统都是有限的。例如,一所房屋、一台机器、一个生物体在时空上都是有限的。同样地,一条物理定律、一国的法律体系、一个数学公式在其内涵和外延上都是有限的,其适用范围也是有限的。

从系统定义上看,也可以说明任何具体系统都是有限的。当我们说任何具体系统都是有限的时候,实际上也就是说系统是有限集合。系统的有限性最终来自构成系统的诸要素在性质和关系上的有限性。至于要素的数量在规定系统有限性中的作用问题,则不能一概而论。大量的现实系统,其要素数量是有限的。但是,在一些抽象系统中,要素的数量有可能是无限的。例如,在数学上,自然数集、整数集、有理数集、实数集、复数集等被看作是“无限集合”;它们的要素个数是无限的。但是,从系统定义上看,这些集合作为系统却是有限的。在这些系统中,每个集合都有与其他集合不同的特定性质和/或特定关系,这就赋予它们有限性。因此,当把系统看作有限集合时,一般来讲,是从其性质和关系方面加以考察的。这样,即便是那些由无穷多个要素组成的系统也被看作是有限集合。“有限集合”一词在这里有着与数学上的“有限集合”不同的含义。这又从一个侧面上指

出了系统学中所研究的系统不是一个纯粹的数学概念,而是系统学本身的概念。

系统的这种有限性是由系统的边界来体现的。在最广泛的意义上,所谓边界,是指表征系统有限性的特定部位或特定的规定性,无论系统的产生或消亡,都以系统边界的存在与否作为其标志之一。

所谓边界,是指处于特定关系中的边缘要素的集合。系统的边界从其作用方式上可分为两种。其一是动态边界,是指这样一些边

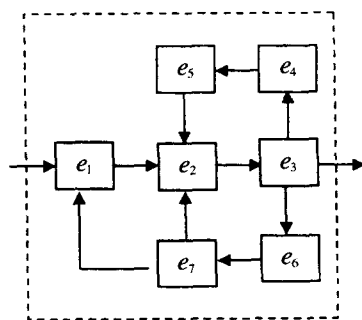


图 3—1 系统动态边界

缘要素的集合,这些要素的输出不或不全转化为该系统其他要素的输入,或者(并且)其输入不或不全来自该系统其他要素的输出。在此,所谓输入,是指一个要素或系统所接受的各种作用,而所谓输出,是指要素或系统所发出的各种作用。例如,在图 3—1 中,由边缘要素 e_1 和 e_3 组成的边界是动态边界,因为: e_1 的输入一部分来自 e_7 ,另一部分来自系统外部; e_3 的输出一部分转化为 e_4 和 e_6 的输入,另一部分则成为该系统的输出。例如,细胞的细胞膜间隙、细胞膜的特殊感受器部位、前突触膜等构成细胞的动态边界。又如,生物体的皮肤、口部、肛门、外感受器官等也构成生物体的动态边界。

其二是静态边界,是由这样一些边缘要素组成的集合,这些要素或其集合阻止该系统其他要素同系统外部的物质发生相互作用。这种要素可称为隔离要素。例如,一台机器的外壳、各种保护层等属于机器的静态边界。又如,生物体的皮毛、鳞、羽毛、毛发、甲壳或其他起隔离作用的部位可视为静态边界。当然,有的边界可既起动态边界作用又起静态边界作用,如生物体的皮肤等。

系统的边界还可以分为物能边界和信息边界,前者在物能方面起作用,后者在信息方面起作用。例如,生物体的物能边界或者允许生物体所需的物能进入体内,或者不允许对生物体有害的物能进入体内。生物体的信息边界可使生物体获取所需的大量信息,亦可阻止有害的信息进入体内。对一个国家来说,国境护卫队不许外国入侵或不许非法人员入境,也不许国内罪犯非法离境;国家的宪法规定该国公民的条件,凡符合这些条件的人,不管他是否居住在该国国界内部,都被看作是该国公民。前者属于物能边界,后者属于信息边界。当然,像海关这样的机构,既起物能边界的作用,如不许本国人随便离境,也不许外国人随便入境,也起信息边界的作用,如不许对本国有害的出版物入境,也不许那些涉及国家机密的出版物出境。

在各种概念系统中,系统边界就是系统的信息边界。例如,在 $F = ma$ 中, F 、 m 、 a 的规定性和这三个量之间的关系就限定了该公式的内涵和外延。其他科学定律以及各种概念系统的情形也是如此。其中每个概念的内涵和外延、各概念之间的逻辑关系规定这些概念系统的边界。

从以上的讨论中,我们还可以知道系统边界有双重作用。其一是流通作用。系统与外界的相互作用都要通过边界才能进行,即是说物能与信息的输入或输出都是通过边界进行的。例如,生物体通过边界摄入食物,排放粪便和其他废弃物。其二是保护作用。一个系统的边界通常只许有利于该系统的物能和信息进入该系统,不许不利于或有害于该系统的物能和信息进入该系统。同时,系统的边界阻止该系统所需的物能和信息流出该系统,允许或促使该系统所不需的物能和信息流出该系统。并且,当不利于或有害于该系统的外界作用被施加到系统时,系统的边界也可以起屏障作用,以防止这种外界作用对系统构成威胁,例如一些动物的坚硬的外壳就起着这种作用。

三、系统与环境

任一具体系统都是有限的对象,而边界体现着这一有限性,所以无论从日常经验上看,还是从逻辑上看,都可以肯定在系统的边界外部存在着其他事物。这样,我们把任一系统边界外部的所有其他事物称为该系统的环境。从系统的定义 $S =_{\text{def}} R[(E)P]$ 或 $S =_{\text{def}} [R(E)]P$ 看,如果我们选择某种特定性质或特定关系,从对象世界中分离出具有这种性质或关系的要素的集合,那么该集合就是一个系统,而对象世界的其余部分就成为该系统的环境。

系统与环境的关系取决于系统和环境的具体性质。一般来讲,系统和环境的关系可分为下列四种,如图 3—2 所示。图中 S 表示系

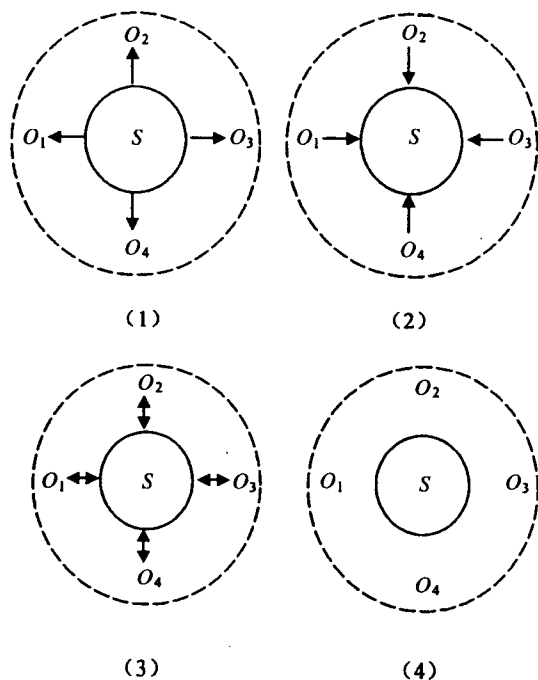


图 3—2 系统与环境的关系

统, O 表示环境。

(1) $S \rightarrow O$, 即系统对环境有作用, 但环境对系统没有作用。在力学中有作用就有反作用, 但系统与环境之间的关系并非如此简单。例如, 一个人对别人或社会的贡献并非总是得到报偿。一般地说, 一个系统对其环境有输出, 但环境却对该系统没有提供任何输入。所以, $S \rightarrow O$ 关系是一种单向性关系。

(2) $S \leftarrow O$, 即环境对系统有作用, 但系统对环境没有任何作用。显然, 这一关系模式是与上一种关系模式正好相反的。例如, 一个系统受到来自环境的刺激, 但没有对这一刺激做出任何反应。一般地说, 一个系统从环境取得输入, 但没有向环境提供任何输出。显然, $S \leftarrow O$ 关系也是一种单向性关系, 只是与 $S \rightarrow O$ 关系方向相反。

(3) $S \leftrightarrow O$, 即系统与环境之间存在着相互作用。即是说, 系统不仅从环境取得输入, 而且向环境提供输出。这是系统与环境之间存在的最广泛的关系模式, 如在生物体的“刺激—反应”模式中所看到的那样。但是, 在 $S \leftrightarrow O$ 关系中, 输出未必是对输入的简单“反应”, 输入也未必是对输出的直接报偿。

(4) $S \nleftrightarrow O$, 即系统不对环境发生作用, 环境也不对系统发生作用。例如, 系统既无输入亦无输出。这时, 系统的边界只由隔离要素组成, 不含任何能构成动态边界的边缘要素。不过, 必须指出, 在实际中不可能有这种模式, 这只是一种近似处理。

我们可以区分广义环境和狭义环境或实际环境。在上面, 我们所使用的是环境或广义环境概念, 系统边界外部的整个世界都被看作是系统的环境。但是, 从(1)、(2)、(3)可知, 在系统与环境之间的正向作用、反向作用或相互作用中, 所涉及的并不是环境的全部, 而是其中的一部分。在广义环境中与系统有输入或(和)输出关系的那部分称为系统的实际环境或狭义环境。例如, 在(1)中, 实际环境是接受系统作用的那部分环境; 在(2)中, 实际环境是向系统提供输入

的那部分环境；在(3)中，对系统提供输入和(或)接受系统输出的那部分环境都被看作是实际环境；在(4)中，环境问题不被考虑。

由于人们对系统与环境关系的认识程度不同，系统的实际环境可能分为两个部分。其一是已知的，即人们已知道广义环境中哪些

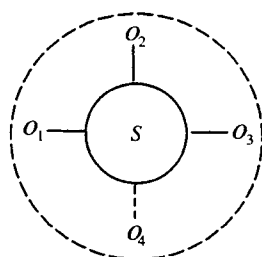


图 3—3 已知与未知
实际环境

部分与系统有作用(单向的或双向的)；其二是未知的，即除了上述已知部分外，还有一些部分与系统有作用(单向的或双向的)，但人们还不知道那是广义环境中的哪些部分。例如，在图 3—2 中，系统的实际环境是 O_1, O_2, O_3, O_4 。但是，在图 3—3 中，已知 O_1, O_2, O_3 是系统的实际环境，但还不知道 O_4 这样一个实际环境部分的存在，尽管它确实属于系统的实际环境。例如，以前

人们长期不了解放射性对人体的影响，当时的人们未曾把放射性看作是与人类有关的环境因素之一，但是放射性却作为一种客观存在的环境因素对人体起各种作用。

在系统研究中，一般来说，我们不只研究系统，而是既研究系统，又研究与系统有关的环境。在研究的初始阶段，当我们把对象世界的某一部分作为系统分离出来时，实际上也就规定了该系统的环境范围。尽管如此，在实际的系统研究中，对环境进行下列简化操作是必要的。

第一，在一定条件下，忽略系统与环境之间的作用，孤立地研究该系统。这种简化一般以系统与环境之间的微弱作用为前提。例如，在牛顿时代人们已经知道磁力的存在。常人的想象力也会促使人们考虑磁力与引力之间的关系。但是牛顿特意忽略了磁力等自然力对引力系统的作用。实际上，这是牛顿获得成功的秘诀之一。在任何一项科学研究中，如果不会进行这种简化操作，一味地强调各种

相互作用,就不可能推进对某一系统的研究工作。

第二,通常,把那些与系统有输入、输出或输入—输出关系的环境因素当作系统的实际环境。首先要确定系统对环境 and 环境对系统的一切可能作用,然后从这“一切可能作用”中找出“一切实际作用”。这是一个如何找出系统与周围世界的一切本质联系的问题。如果我们忽略或尚未找出对系统有重要作用的某种环境因素,就有可能使我们的研究工作走向歧途。反之,如果研究者找出对系统有重要作用的某种环境因素,就有可能取得研究工作的成功。

第三,在一定条件下,把一个系统与它的实际环境结合而构成新的系统,并把这个新系统当作与其环境没有关系的系统来研究。

3.1.3 系统与非系统

系统、要素、环境的区分不是绝对的,而是相对的。同一个研究对象在不同参照系中可能被当作系统、要素或环境。例如,同样一个人,在生物学上是一个系统,在社会学上是家庭的要素,而对他人而言却属于其环境。又如一个原子,是由原子核和电子组成的系统,又是由它和其他原子构成的分子的要素,或者属于与它有相互作用的其他系统的环境。这样,一个研究对象究竟被看作是系统、要素还是环境,完全取决于所选取的是何种参照系。

更一般地说,系统概念的相对性表明非系统概念的合理性。在一个参照系中,如果一个或一类研究对象被看作是系统,那么其要素和环境就被看作是非系统。按照一种系统形成关系来说被看作是系统的研究对象,按照另一种系统形成关系来看可能不是系统;按照一种特定性质或关系来说是系统的研究对象,按照另一种特定性质或关系来看却不是系统;反之亦然。例如,在一个房间里发生过犯罪行为,各种东西的分布杂乱无章,一片混乱。这时,家庭主妇会认为这里不存在系统性,但是一个公安人员却会尽力发现其中的系统性。

又如,在战场上,一群逃兵显然不是以连排形式存在的系统,但是他们每个人作为生物体仍然是一个系统;不仅如此,逃兵的全体对于指挥官来说仍然是一个需要认真对待的系统,并且又是整个社会系统的一部分。

但是,如果有人认为非系统的存在否定了系统概念的普遍性,那就大错特错了。系统概念的相对性并不否定它的普遍性。系统概念是从各种具体系统中抽象出来的普遍概念,而系统概念所表示的一般系统在其现实性上是存在于各种具体系统中的。现实的系统都是具体系统。有人认为:一所完好的房屋是一个系统,但它被炸毁后就不是系统。如果这里所使用的是同一个参照系,那么这一观点是可以理解的。但是如果以此例否定系统概念的普遍性,那就错了。我们完全可以在描述完好的房屋时采用一个参照系,而在描述被炸毁的房屋时采用另一个参照系,从而把一所完好房屋和被炸毁的房屋都看作是某种系统。在哲学上,对立统一规律被认为是世界的普遍规律,但是我们不能用矛盾概念来胡乱议论“悲剧”与“加法”、“牛头”与“马嘴”之间的对立统一关系。相仿地,在系统学中,我们不能把适合于某种具体状况的具体系统概念随意推广到这些具体系统概念所不适用的状况中去。

因此,我们不能把现实世界分为系统世界和非系统世界,或者把现实世界中的一部分事物看作系统,另一部分看作非系统。正如尤金(Э. Г. Юдин)和萨多夫斯基(Вадим Николаевич Садовский)所指出的那样,把现实世界中的事物分为系统和非系统的“方式是没有前途的,对这一点的最好说明是下述的事实:至今实践中还不能较清楚地描述那样的客体领域,其客体可以有把握地说成结构客体或系统客体。问题在于,不管客体的研究任务怎样,客体本身不能得到系统客体或相应地非系统客体的绝对特性表示。相反,同样一个(原则上在本体论方面)客体,在不同的任务中,既可作为非系统客体来研究,

也可作为系统客体来研究”^①。看来,问题完全取决于参照系的选择。在适当的参照系中,任何对象物都被看作是系统。

总之,系统概念适用于一切研究对象。“系统”无处不在,无所不包。问题不在于一个研究对象是不是系统,而在于它在何种意义下是一个系统,或者说它是一个什么系统。例如,一盘散沙,虽不能看作生物系统或电磁系统,但仍可看作一个力学系统。又如,一只猫虽不能看作政治系统或社会经济系统,但可看作一个生物系统。现实中的一切研究对象虽然不能看作“××系统”,但是却能看作另一种“○○系统”。因此,我们必须具体地研究具体的对象。

3.2 结构与功能

凡系统都有结构与功能,更确切地说系统是结构与功能的统一体。如何理解结构与要素分布、功能与要素活动、结构与功能之间的关系,乃是系统学的一个基本问题。

“结构”与“功能”是系统学的一对基本概念。但是在系统学产生之前这一对概念已在诸多科学领域得到广泛应用,尤其在生物学和社会学领域“结构”与“功能”被看作是不可缺少的一对概念。下面,我将先介绍不同学科的学者们对“结构”与“功能”的基本观点,然后阐述我的观点。

3.2.1 结构与功能:传统观点

一、几种结构定义

“结构”一词现在广泛使用于几乎所有的科学研究领域和应用领域。例如,数学家在谈论数学结构,物理科学家在谈论物质结构,生

^① 乌约莫夫 A. И. 系统方式和一般系统论. 长春:吉林人民出版社,1983. 133

物科学家在谈论生物结构,社会科学家在谈论社会结构,思维科学家在谈论思维结构,系统科学家在谈论系统结构,诸如此类。在社会科学领域甚至出现了所谓结构主义的思潮。其代表人物为巴特(Roland Barthes, 1915—1980)、列维-斯特劳斯(Claude Levi-Strauss, 1908—1990)、阿尔都塞(Louis Pierre Althusser, 1918—1990)、福柯(Michel Foucault, 1926—1984)、拉康(Jaques Marie Emile Lacan, 1901—1981)等,而马克思、弗洛伊德(Sigmund Freud, 1856—1939)、索绪尔(Ferdinand de Saussur, 1857—1913)、雅柯布逊(Roman Osipovich Jakobson, 1896—1982)等被看作是结构主义的源流。

但是,在上述的大多数科学领域,人们对结构的理解互不相同,而且也没有给出严格的结构定义。使用结构概念时所出现的这种混乱情况可在下面所介绍的几种结构定义中略知大概^①。

1. 辞书中的“结构”

在《辞海》中,结构有下列几种解释:

- (1) 构造房屋(做动词)。
- (2) 屋宇构造的式样。各个部分的配合;组织。如物质结构、工程结构、文章结构。
- (3) 文艺作品的组织方式和内部构造。
- (4) 同“功能”相对。

从上可了解“结构”的大致词义。但是需要指出的是,现在被用于科学领域的“结构”一词,实际上是英语单词 structure 的译语。从韦伯斯特辞典和其他英语词典中可知,该词的词源为拉丁语 struere,表示“堆积事物,为其赋予形状和/或排列”之义。在现代英语中,structure 一词表示下列词义:

^① 公文俊平、高原康彦编,一般システム研究の成果と展望,横浜:日本 GSR 研究会,1987,193—245

- (1) 复杂的存在物;
- (2) 在复杂存在物中要素或部分的配置或装配;
- (3) 复杂存在物的组织原理,或各部分之间的相互关系;
- (4) 构造复杂存在物的活动;
- (5) 由上述的组织原理或相互关系所构成的整体。

从上可知,作为日常用语,在汉语和欧美语言中“结构”通常指下列几种意思:

- (a) 事物在空间(或时间、因果关系、逻辑关系)上的有序配置;
- (b) 各要素或各部分按照(a)所示的有序配置所形成的更大更复杂的事物;
- (c) 为事物赋予(a)或(b)所示有序配置的原理。

2. 数学上的“结构”

在现代数学中,结构概念有明确的定义,它以作为数学对象的“集合(及其元素)”概念为前提。集合是指若干个别对象(元素)的汇合。当我们以某个集合 A 为基础,对集合 A 各元素的结合方式赋予某种限制,就可对直积 A^n 指定数学关系 $R \subseteq A^n$ 。作为关系 R 的特殊情形,有集合 A 上的“函数”或“变换(或运算)” F 。这种关系(或函数,或函数关系)不限于一个,可能有多个。这样,所谓数学结构,是指由集合 A 、关系 R_i 和(或)函数 F_i 构成的整体,如代数结构、序结构、拓扑结构、因果结构等。也就是说,数学结构是诸元素之间有某种关系的整体。

按照上述的数学结构定义,数学结构就是数学对象。但是,也有人把上述意义下的数学结构看作是“数学系统”,只把其中的关系和函数称为数学结构。在这种意义下,数学结构不是数学对象本身,而是数学对象所具有的性质。

3. 经济学上的“结构”

在经济学中结构概念已成为常用词,但是在经济学领域所使用的结构概念的意义并不统一。

例如,人们经常谈论产业结构。产业结构概念通常包括两方面的内容^①。其一是指各产业之间相互关系的总体,即所谓产业间结构,表示各产业的比率关系。例如,克拉克(Colin Grant Clark, 1905—1989)的配第(William Petty, 1623—1687)定律中所说的产业结构表示第一产业、第二产业和第三产业在整个产业中的比率,霍夫曼(W. G. Hoffman)定律中所说的工业结构表示轻工业和重工业在整个工业中的比率,里昂惕夫的投入产出表也表示产业间结构。其二是指某一产业自身的结构,即所谓产业内结构,表示某一特定产业中的企业数目、集中化程度、开业壁垒、产品需求的价格弹性、需求大小及其增长率等。这种意义下的产业结构通常称为产业组织。不难看出,产业结构中的“结构”在其意义上与辞典中给出的作为日常用语的“结构”并没有多大区别。

但是在计量经济学中结构概念有其特定的含义。计量经济学中用结构方程表示内生变量、外生变量、参量、概率变量的相互依赖关系。其中,又区分模型和结构。在模型中参量就以变量出现,而在结构中为模型中的参量赋予具体数值,从而反映特定时期特定国家的经济结构。例如,克莱茵(Lawrence Robert Klein, 1920—)曾给出下列模型:

$$\left. \begin{aligned} C &= \alpha_0 + \alpha_1(W_1 + W_2) + \alpha_2\Pi + \alpha_3\Pi_{-1} + u_1 \\ I &= \beta_0 + \beta_1\Pi + \beta_2\Pi_{-1} + \beta_3K_{-1} + u_2 \\ W_1 &= \gamma_0 + \gamma_1(Y + T - W_2) + \gamma_2(Y + T - W_2)_{-1} \\ &\quad + \gamma_3t + u_3 \\ Y + T &= C + I + G \\ Y &= W_1 + W_2 + \Pi \\ \Delta K &= I \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

其中, C : 消费, I : 净投资额, W_1 : 私人企业所支付的工资总额, Π : 利

① 朴昌根. 韩国产业结构. 上海: 上海人民出版社, 1998. 47

润, K : 资本总额, Y : 国民收入, G : 政府支出, W_2 : 政府所支付的工资总额, T : 企业税额, t : 时间, u_1, u_2, u_3 : 概率变量。1921—1941 年间美国的再生产结构为

$$\left. \begin{aligned} C &= 16.78 + 0.80(W_1 + W_2) + 0.20\Pi + 0.23\Pi_{-1} + u_1 \\ I &= 17.79 + 0.23\Pi + 0.55\Pi_{-1} - 0.15K_{-1} + u_2 \\ W_1 &= 1.60 + 0.42(Y + T - W_2) + 0.16(Y + T - W_2)_{-1} \\ &\quad + 0.13(t - 1931) + u_3 \\ Y + T &= C + I + G \\ Y &= W_1 + W_2 + \Pi \\ \Delta K &= I \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

显然, 计量经济学中所说的“模型”与“结构”的区分并不妥当。实际上这里所说的“模型”应该是经济系统的结构, 而这里所说的“结构”应该是一个特定时期的结构。

4. 社会学与人类学中的“结构”

随着结构主义的兴起, 人们认为社会学和人类学以“社会结构”作为研究对象。前者主要研究文明社会的结构, 后者主要研究无文字社会的结构。虽然这里所说的“结构”究竟是什么并不清楚, 但是通常把人们在社会中的互动被制约而定型的状态说成是“已确立了社会结构的状态”。这是因为不管“结构”概念的适用对象是什么, 它总是用来表示构成要素的相互关系的模式相对不变的状态。

英国社会人类学家芮克里夫 - 布朗 (Alfred Reginald Radcliffe-Brown, 1881—1955) 写道: “直接观察的确向我们揭示, 人类由一个复杂的人与人的关系的网络联系着。我用‘社会结构’这个词指实际存在的关系的网络。”^① 这就意味着为了规定社会结构, 就得规定相

① 北京大学外国哲学研究所(编译). 外国哲学资料第四辑. 北京商务印书馆, 1978. 184

当于关系的自变量的“要素”与其间的“关系”。但是,这里的规定方式不是惟一的。一般来讲,研究对象越复杂,所能给出的关系就越复杂多样。这样,一个对象可以被看作是是用来把握该对象的多个系统之间的关系。关系的规定方式的多样性,导致社会结构概念的多样性。

当我们考虑一个集合 A 时,可考察其中关系的多样性,而这种多样性可在关系的层次上加以讨论。显然,存在着下列三个层次:

- (1) 要素之间的关系,当自变量只取 A 的要素;
- (2) 关系的关系,当自变量可取“关系”;
- (3) 系统之间的关系。

不难看出,从数学上看没有必要一定要区分(1)和(2),因为:如果设(1)的关系为一阶关系,那么以一阶关系为自变量的关系是二阶关系,而以二阶关系为自变量的关系就是三阶关系,以此类推。当存在着 n 阶关系时,作为自变量的 $n-1$ 阶关系就属于 A ,从而高阶关系可归结为(1)。例如,考虑三个家族 A 、 B 、 C 。首先,把 A 看作是有 R_{1a} (父子关系)、 R_{2a} (夫妇关系)、 R_{3a} (兄弟姐妹关系)的系统。 $R_{1a} - R_{3a}$ 相当于(1)。同样,对于 B 、 C ,亦可规定关系 $R_{1b} - R_{3b}$ 、 $R_{1c} - R_{3c}$ 。其次,设 A 、 B 、 C 的子女互为堂表兄弟姐妹。这时,如果把 A 、 B 、 C 三个家族当作一个系统,那么这个系统不仅仅是 A 、 B 、 C 之和,而应当把 R_{3a} 、 R_{3b} 、 R_{3c} 作为 R_4 (堂表兄弟姐妹之间关系)的自变量包括在其中。这样,规定该系统结构的关系有 $R_{1a} - R_{3a}$ 、 $R_{1b} - R_{3b}$ 、 $R_{1c} - R_{3c}$ 、 R_4 。 R_4 是关系的关系,相当于(2)。如果不把 A 、 B 、 C 集中在一起,而是把它们分别看作一个系统,那么 R_4 就成为 A 、 B 、 C 这三个系统之间的关系,即(3)。

此外,是否取 $R_{1a} - R_4$ 为关系也是随意的。实际上这取决于对 A 、 B 、 C 的系统认识。这样,结构概念的多样性与关系层次和关系类型的选取有关。

布劳(Peter Michael Blau, 1918—2002)关于社会结构的观点也是值得讨论的。他认为,所谓社会结构,是“与社会生活中可识别的模式、可观察的规则以及可发现的配置有关的”。^① 他并没有给出社会结构的确切定义。他认为,在美国社会学家那里,关于社会结构有三种主要“意象”。那就是:

- (1) 配置(configuration)
- (2) 下层(substratum)
- (3) 分化(differentiation)

在(1)中,对社会结构的理解建立在与几何结构的类比基础上。在几何学中,十字形或正方形等几何图形的种类与其说是取决于作为其要素的各点的性质,不如说是取决于各点相互之间的配置关系(几何结构)。类似地,可以认为社会现象取决于作为其要素的个人或集团的相互配置关系(社会结构),而这种配置关系表现为这些个人或集团的地位和作用。这种意义下的结构概念相当于以形成规则为基础的数学结构。

在(2)中,社会结构相当于列维-斯特劳斯的深层结构,见图3—4和马克思的下层结构,它位于在社会表层或上层中表现出来的人们的行为和关系的深处。其具体内容或者是制度化的规范或价值,或者是技术和经济组织等客观条件。但是这里的结构概念作为一个抽象的结构概念,与以后要介绍的克里尔的把结构理解为“产生行为(关系)的东西”这样的结构概念是一致的。

在(3)中,“社会中各人地位的分化所形成的多维空间”被看作是“社会结构”,而各种社会的差异取决于分化的形式和程度(结构复杂度)。与“数学结构”概念相比较而言,这种看法与其说是着眼于“基

① 公文俊平,高原康彦(编).一般システム研究の成果と展望.横浜:日本GSR研究会,1987.204

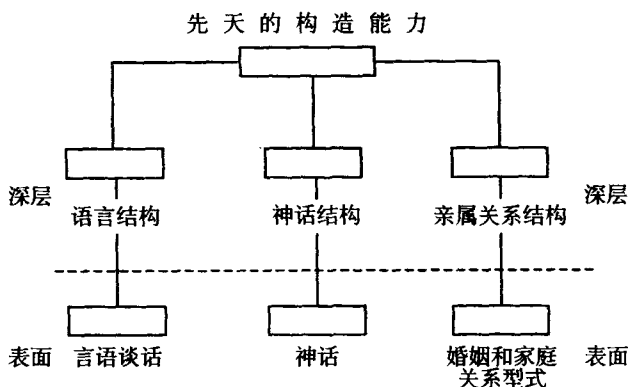


图 3—4 社会系统之深层结构与表面活动

基础集合”的各元素之间的相互关系，不如说是着眼于元素在种类和数目上的区别。但是，在考虑“社会地位”这一“元素”（或变量）的特征时，不可能与其他元素相隔离起来考虑。所以，这里的“结构”实则对应于被视为“数学系统”的“数学结构”。

从上可知，布劳所加以区别的关于“社会结构”的三种意象之间的差异有的来自对社会的不同意象，有的来自对结构概念本身的不同理解。

总之，在社会学和人类学领域虽然“社会结构”概念用得非常广泛，但是人们至今还未能给出“社会结构”的严格定义。

5. 系统理论家克里尔的“结构”

自从贝塔朗菲提出一般系统理论以来，系统理论界为了确切地定义结构概念，并统一各领域中所使用的结构概念，已经作了大量的努力。这里，我们只看克里尔关于系统结构的定义。

在克里尔看来，所谓系统，是可用一组变量（它们皆为时间函数）值的轨道来描述其活动的存在物。他把与系统有关的各变量之间的“时不变关系”称为系统的行为，又把系统行为分为三种：

- (1) 永久行为;
- (2) 相对永久行为;
- (3) 暂时行为。

他把“产生行为的系统特性”称为系统的组织。这时,由于系统行为是可变的,组织也不能没有可变部分。他把组织的可变部分称为“程序”,不变部分称为“结构”,并且把作为永久行为基础的结构称为“真实结构”,作为相对永久行为基础的结构称为“假想结构”。

值得注意的是,克里尔所说的“行为”表现为系统诸变量定义域的直积集合的子集,即“关系”。换言之,他所说的“行为”相当于其他人所说的“形成规则”或“结构”。这样,克里尔所说的“结构”被看作是位于“关系”背后的“产生关系的东西”。

克里尔举出两种结构作为上述意义下的“结构”。其一,是分解与系统整体有关的“关系”而得到的更简单的关系,相当于与子系统或要素有关的“关系”(要素的行为)。系统的行为则是这些要素关系或要素行为的“共同部分”。换言之,各要素的“耦合”产生系统的行为。如果把系统诸要素的集合称为“论域”,那么要素行为的共同部分可称为系统的“论域—耦合结构”。

值得注意的是克里尔所说的“系统”与“要素”并非直接对应于数学结构中的“集合”与“元素”。在数学上,克里尔的“结构”对应于方程组,“要素行为”对应于各个方程,而系统的“行为”或“关系”对应于方程组的解。即是说,他的“结构”是指位于系统整体的“关系=解”的背后并产生这些“关系=解”的各个关系的总体。

因此,如果把克里尔的“论域—耦合结构”当作是最基本的结构定义,那么“数学结构”就可以称之为“数学关系”或简称为“关系”。另一方面,他所说的“要素行为”对应于作为关系的“数学结构”。那么,就可以在与系统整体的对比中设定子系统或要素(它们对应于一个“数学体系”)的存在,作为具有要素行为的对象。可以说,克里尔

通过把系统整体的行为分解为若干个要素行为,使对要素行为承担者的“子系统”或“要素”的理论设定成为可能。在这种意义下,我们就可以区分“集合”的“元素”和“系统”的“要素”。“集合”相当于与系统有关的所有变量的“定义域”,而“元素”相当于这些变量的值。

其二,是所谓状态转移结构。我们先用一组与系统有关的各变量的值来表示各时刻的系统状态。这时,某一时刻的系统状态可表示为与系统有关的所有变量的定义域的直积集合(S)的一个元素。而且,系统状态的转移可表现为 S 中的一个元素向另一个元素的运动。当这种转移可表示为从 S 到 S 的时不变“映射”(即 S 与其自己的直积中的“关系”)时,这种“映射”或“关系”就称为“状态转移结构”。

可见,克里尔的第二种结构定义与数学结构的定义没有多大区别。

二、几种功能定义

与结构概念的情形相仿,功能概念也用得非常广泛,但是对功能概念的理解上仍然存在着不同的甚至是针锋相对的各种观点。下面看关于功能的几种定义。

1. 辞书中的“功能”

在《辞海》中,功能有三种解释:

- (1) 事功和能力,如“观本行于乡党,考功能于官职”。
- (2) 功效;作用。多指器官和机件而言,如肝功能,钢管的功能。
- (3) 同“结构”相对。指有特定结构的事物或系统在内部和外部的联系和关系中表现出来的特性和能力。

从上可了解“功能”的大致词义。但是,如同现在被用于科学领域的“结构”是英文词 structure 的译语一样,现在科学领域广泛使用的“功能”一词是英文词 function 的译语。在英语中,function 一词表示下列词义:

- (1) 人或公共机构所特有的活动;
- (2) 一个事物满足其目的的作用或活动的方式;
- (3) 职务, 职责;
- (4) 宗教仪式或其他公共集会;
- (5) 数学上的函数;
- (6) 计算机的基本效能;
- (7) (器官等) 活动; (机器等) 运行; 起作用 (作为动词使用)。

从上可知, 作为日常用语, 中文中的“功能”与英语中 function 的词义中的(1)、(2)、(6)有关。英文中的 function 具有比中文中的“功能”更多的词义, 但包含着中文中“功能”的全部词义。

2. 数学中的“功能”(函数)

在数学上一般不用“数学功能”一词。但是, 在对 function 的中文解释中, 我们已经注意到, 中文中的“功能”与“函数”在英文中均以 function 一词表示, 也就是说, 数学上的“函数”相当于“数学功能”, 表示我们在前面讨论数学结构时所说的“数学关系”的一种特殊情形。

但是, 函数这个概念所表示的含义并不是惟一的。它可以表示:

- (1) 直积集合的子集;
- (2) 函数的对应规则;
- (3) 函数关系中的因变量。

例如, 集合 A 与 B 之间的对应规则 σ 与函数概念相一致; 在 $y = f(x)$ 中, 既可以说 y 是 x 的函数, 亦可以说 y 是 x 的因变量。

但是, 在所有情况下, “函数”意义下的“数学功能”不是“数学结构”的同位概念, 而是它的下层概念, 即是说, “数学结构”包含着“数学功能”, “数学功能”只是“数学结构”的一种特殊方面。

3. 物理学中的“功能”

考虑在时空中占据某一领域的存在物 (对象物), 可用一组变量

(例如,对象物的位置、速度、温度、颜色等)的值表示该对象物在各时刻的状态。这时,如果对象物的状态变化(即事件)主要依赖于作为系统整体的该对象物的运动,那么该对象物的状态变化可称为它的“活动”。而且,如果某一对象物 A 的状态 x 的变化取决于另一对象物 B 的存在或 B 的特定状态(或状态变化) y ,那么我们就可以讨论 B 对 A 的“作用”(或 y 对 x 的作用)。不过,更确切地说,在物理作用的场合下, x 的变化不仅仅是 y 的变化的结果,它还依赖于 x 原来处在什么样的状态。与此不同,数学作用作为数学关系的特殊内容,表示集合 B 对集合 A 的关系,是指直积 $A \times B$ (或 $B \times A$)到集合 A 的映射。从形式上看,物理作用也可以写成从作用物体 B 的活动 y 的定义域 Y 和活动物体 A 的活动 x 的定义域 X 的直积 $Y \times X$ 到 X 的映射。在这种意义上,“物理功能”和“数学功能”的含义是相同的。两者的区别在于在数学作用(或数学关系)中,并不预先设定集合的背后所存在的物理对象。

但是,不管怎样,某一对象物的“物理功能”,是指

(1) 对象物 A 的活动;

或者,

(2) 对象物 B (或者其状态 y)对对象物 A (或者其状态 x)的作用。

在“物理功能”的意义上使用“功能”概念的例子并非少见。但是有的人认为,在这种情况下与其使用“功能”概念,不如直接使用“活动”或“作用”概念。

4. 生物学中的“功能”

暂且不论数学意义上的“功能”(函数)概念,那么“功能”概念最初在生物学或生理学领域取得了作为一个科学术语的重要地位。

生理功能是在一个整体系统框架中给以定义的。考虑两个活动物体,通常取整体 w 及其部分 p ,并设定一方(通常是 p)对另一方

(通常是 w)起作用。为了使 w 维持某种特定的活动状态(目标状态), p 必须处在某种特定的活动状态(要素状态)。这时,对于 w 的活动所必需的 p 对 w 的作用,可称为 p 对 w 的(生理)“功能”。这样,可将 p 的活动(或作用)称为“要素功能”, w 的活动称为“目标功能”。

通常,人们在“部分”与“整体”之间的关系中考察上述意义上的“生理功能”,但是也可以在构成“整体”的各“部分”之间的关系中考察“生理功能”。不管怎样,发挥“要素功能”的“部分”作为一个对象物可以称为“功能体”,而由功能体组成的整体系统就可称为“功能系统”。

5. 社会系统理论中的“功能”

“社会系统理论”有各种不同流派。我们在这里所要介绍的是日本学者公文俊平的“社会系统理论”中的“功能”概念。他把社会系统理论中的“功能”称为“目的论功能”,把为定义目的论功能所需的社会系统称为“主体系统”。“主体”亦可称为“行动者”。“主体”具有下列特征:

(1) 主体有能力把世界分成各种对象和事件加以认识,并且有能力按照某种标准,对被分割的对象、事件或它们的组进行分类。尤其是主体有能力按照自己的期望程度对这些对象、事件或它们的组进行分类(即“评价”)。

(2) 主体有能力设定在对象或事件的不同类之间存在着(物理)作用关系、(生理)功能关系等结合关系。

(3) 主体对某些对象可以施加使之成为某种作用关系和功能关系的原因的作用。这可称为“手段”的“使用”。为了通过“手段”实现特定的期望状态(“目标”),主体对所要使用的手段的种类和使用方式进行选择,并付诸使用。这称为主体的“行为”。主体不仅是认识和评价的主体,而且是行为的主体。

这样,可从下列两种意义上定义“功能”:

(1) 主体的功能(行为方面):指主体通过自己的行为达到自己所设定的目标,以及所达到的目标本身;

(2) 对象、事件的功能(认识、评价方面):当主体认为某一对象(的活动或事件)有能力帮助主体实现目标时,就说该对象(或事件)对于主体的目标发挥(正)功能。在相反的情形下,使用负功能的概念。凡有助于实现主体目标的作用都是对象物的(正)功能,而凡有害于实现主体目标的作用都是对象物的负功能。同样,如果考虑某一对象物的作用对于实现目标是否必要,就可使用对象物的“要素功能”概念。这种意义下的“功能”也可以由主体投影到不限于主体系统的其他任意系统或其某个部分。

在上述两种“功能”中,本来意义上的“目的论功能”显然是(1)的“行为功能”,而(2)是通过扩展而拟人化(或拟主体化)并被附加到其他对象物(尤其是其他主体)上的功能概念。

除以上所介绍和讨论的结构和功能定义之外,我们在贝塔朗菲和米勒以及其他一些人的著作中也可以看到各种不同的结构和功能概念。有兴趣的读者可参看他们的著作。

3.2.2 结构与功能:新的探索

从上面关于结构与功能的各种不同定义的介绍与讨论中,可以看出无论在诸多具体科学领域还是在系统研究领域,对这一对概念至今存在着各种不同的观点。在系统学领域,我认为应该从系统定义出发考察系统的结构与功能。按照这一思路得出的结果对具体科学领域的研究也将有所裨益。

一、关系及其多样性

在定义系统概念时,我们使用了要素、性质、关系和集合的概念。从内容上看,性质和关系是不同的,性质表示事物的特性。当我们说

某一事物有某种特性的时候,是指这种特性属于该事物而不属于别的任一事物。对一事物性质的描述不会改变这一事物,不会因此而形成新事物。

与此不同,对关系的描述会产生新的结果。例如,三个数(2,3,5)具有“是质数”这个性质,但仍然是独立的三个数。但是,如果它们之间确立了“ $2 < 3 < 5$ ”的关系,那么我们就得到了一个新对象即一个三元组。可找出这个三元组的性质,如自然数中质数的第一个三元组。可见,一些事物之间确立某种关系,就导致某种新事物的形成。从而可知性质和关系的区别:一事物的性质表示该事物的特性,但是一事物不能由于它的性质而成为另一种事物,实际上一事物正是由于它的性质而不能成为另一种事物;另一方面,不同事物之间一旦确立了某种关系,就会产生有别于原事物的某种新事物。不过,这并不是说关系不能存在于同一个对象中。例如,在“我想我自己”这个句子中,对象只有一个即“我”。这句话表示自己同自己的关系。但是由于这种关系而形成新事物,即一对互相想着的主体。又如,在同一性关系 $a \equiv a$ 中,所考虑的已不是单独的 a ,而是由于建立了同一性关系而形成的一个二元组 (a, a) 。

但是,说性质和关系有区别,并不意味着两者之间没有关系。黑格尔认为:事物的性质是它同其他事物的一定的相关关系;而且性质是相互发生关系的某种方法。这样,性质可用关系来定义,“一事物的性质就是存在于包含该事物的那个事物中的关系”。^① 同样,关系亦可用性质来定义。实际上,任何一种关系都在某种程度上表明该关系所在的事物的特性。即是说,“事物的关系是一种性质,是表明该事物所在的那个事物的特性”。^②

正是由于性质可定义为关系而关系亦可定义为性质,在系统定

①② 乌约莫夫 A И. 系统方式和一般系统论. 长春:吉林人民出版社,1983. 85

义(见式(2.5)与(2.6))中性质和关系之间存在着对偶性。因此,当我们讨论系统的一般原理时,既可从性质出发,亦可从关系出发。下面,将从关系出发讨论系统的结构和功能。

从系统的定义可知,任一系统的要素之间都有特定的关系。对各种具体系统而言,要素之间的关系是多种多样的。

(1) 在日常生活中,父子、兄弟姐妹、师生、同事、同乡、同班、邻居等都表示一定的关系。

(2) 在数学中关系是一个极为重要的概念。在集合论中,当一个集合 R 的每一元素都是序对集合时,称 R 为一个关系。例如, $\{<3,4>, <3,5>, <4,5>\}$ 是对于集合 $\{3,4,5\}$ 的一个“小于($<$)”关系。又如,“属于”、“含有”、“对应”、“相似”、“等价”、“同构”等都表示关系。在数学中通常被称为“运算”的“并”、“交”、“差”、“余”、“析取”、“合取”、“加减乘除”等实际上也就是广义上的关系。

(3) 在原子核内部,有引力相互作用、弱相互作用、电磁相互作用、强相互作用。不仅这些相互作用表示关系,而且这些相互作用之间也存在着关系。

(4) 在生物界中,存在着同化与异化、遗传与变异之间的各种关系。

(5) 在社会生活中,可以看到帝王与臣民、官与民、阶级与阶级、阶层与阶层、集团与集团之间的各种关系。

(6) 在所有物质系统内部,可观察到三种关系,其一是物质关系,如用电话机通话的两个人靠电话线路发生联系;其二是能量关系,如两个通话人之间有声波与电能的转换;其三是信息关系,如两个通话人互相交换信息。

(7) 在大量复杂系统中,要素之间存在着竞争与合作、对立与统一、排斥与吸引等关系。

此外,还可以找出系统要素之间的其他多种关系。从总体上

看,我们可以把系统各要素之间的各种关系分为两大类,即分布关系和活动关系。实际上,系统的结构与功能是与这两种关系相对应的一对概念。在结构与功能的定义上之所以存在各种各样的混乱,其主要原因就在于人们没有区分系统内部的分布关系和活动关系。

二、什么是结构

1. 分布关系与结构

所谓分布关系,是表示系统要素在系统内部的排列、所处位置、所处范围的概念。根据具体系统的不同类型,可以区分各种分布关系。这里我们要给出几种实例。

(1) 空间分布关系。这一关系表示物质系统内部各要素在三维空间上的分布关系。例如,在图 3—5 中可看出构成分子的原子的分布及其相互关系。

(2) 时间分布关系。这一关系表示在物质系统内部各要素在一维时间上的分布关系。例如,在图 3—6 中可看出日本的经济结构中农业所占的比重逐年减少的情况。实际上,在整个产业结构中,第一产业的比重在快速下降,第二产业的比重也在下降,而第三产业的比重在迅速增大,如表 3.1 所示。

(3) 词汇在句子中的分布关系。

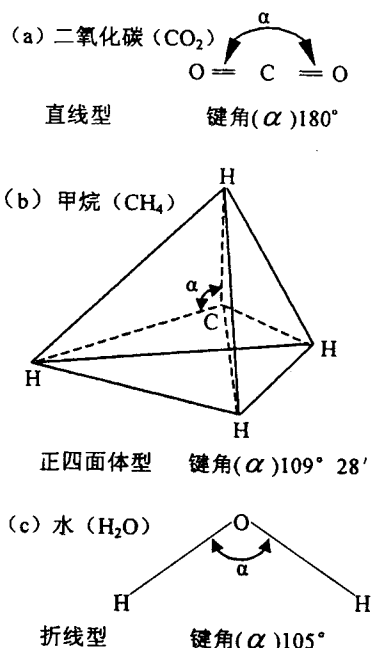


图 3—5 分子结构

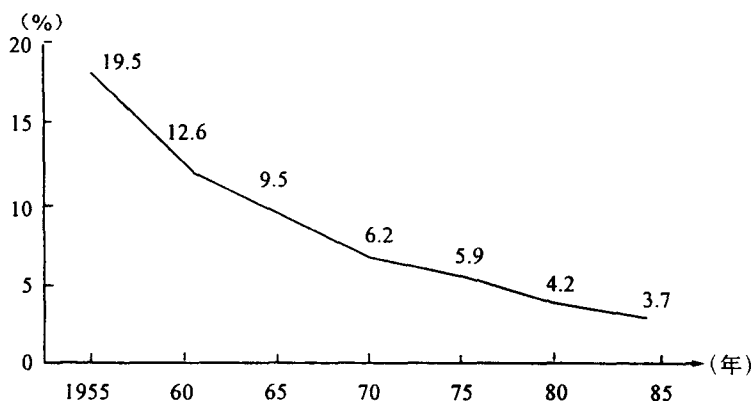


图 3—6 日本国民生产总值中农业所占比重

来源：日本农林水产省；引自：日本 Japan Echo Inc.；

今天的日本，国际教育资讯社，1989. 51

表 3.1 日本就业结构的前景(单位:千人)

	劳动人口			年均增长		
	1985	1993	2000	1980—1985	1985—1993	1993—2000
第一产业(a)	5090	4390	3450	- 136	- 83	- 134
第二产业(b)	19920	19700	19540	134	- 28	- 23
制造业	14530	13950	13350	174	- 73	- 86
第三产业(c)	33060	37250	40120	544	524	410
服务业	16350	20690	23100	412	543	344
总数(a + b + c)	58070	61340	63100	542	409	253

来源：日本经济企划厅；同上书，63

我们考察主语、谓语和宾语在句子中的分布情况。在汉语和英语中这三者通常以“主语—谓语—宾语”的顺序排列，例如：

他正在吃苹果。(汉语)

He is eating an apple. (英语)

但是,在韩语和日语中这三者通常以“主语-宾语-谓语”的顺序排列,例如:

그는 사과를 먹고 있다. (韩语)

彼は林子を食べている。(日本語)

可知,“他(He,그,彼)”、“苹果(apple,사과,林子)”、“吃(eat,먹다,食べる)”的顺序在前两种语言和后两种语言中不一样。

(4) 在形式逻辑中各命题之间的分布关系是不能随意调换的。例如在演绎推理中,大前提与小前提的位置可以互相调换,但结论与大前提或小前提的位置是不能调换的。例如:

大前提:凡生物必死

小前提:凡人是生物

结论:凡人必死

这一推理过程可写成:

小前提:凡人是生物

大前提:凡生物必死

结论:凡人必死

但不能写成:

大前提:凡生物必死

小前提:凡人必死

结论:凡人是生物

或

大前提:凡人是生物

小前提:凡人必死

结论:凡生物必死

(5) 空间分布关系的时间分布。亦可称为空间—时间分布关

系。上面所考察的空间分布关系是“静态”的,而时间分布关系是动态的。我们还可以观察到动态的空间分布关系。例如,肺的生长始于一个芽,它生长成支气管,从中又生成两个芽,这一过程连续不断。

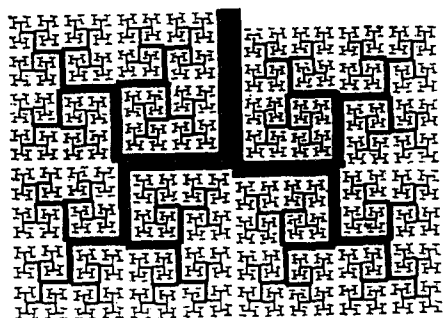


图 3—7 递推支气管

因此,在支气管的生长过程中,空间分布关系是随时间变化的,直到停止生长为止。在几何模型中,这个过程可视为一个无穷过程,如图 3—7 所示。

除了上面所举的几个简单例子外,在其他的所有具体系统中,我们都可以找出

其要素之间的特定分布关系。从系统要素之间的分布关系的概念出发,可以引入系统结构概念。在使各要素的集合成为系统的各种关系中,我们把各要素之间的全部分布关系的总体称为系统的结构。在物质系统中,要素之间的分布关系可能是空间上的,见图 3—5,可能是时间上的,见图 3—6,也可能是时空上的(如在图 3—7 等诸多耗散结构的实例中所看到的那样),从而形成系统的空间结构、时间结构或时空结构。在思维系统中,要素之间的分布关系可能是逻辑上的,可能是语言上的,也可能是符号学上的,从而形成逻辑结构、语言结构或符号结构。

系统的结构是系统内部各要素之间分布关系的总体,而不是单个的分布关系。例如,在图 3—5(a)中,单个的 $C=O$ 关系不能构成 CO_2 的结构,只有两个 $O=C$ 关系以及这两个关系的关系(即键角 $(\alpha)180^\circ$)才能形成 CO_2 的结构。图 3—5(b)的情况更复杂些。 C 与 H 之间的四个关系以及这些关系之间的关系(指键角 $(\alpha)109^\circ28'$)的总体才形成 CH_4 的结构。当一个系统只由两个要素构成时,它们之

间的分布关系本身就是该系统的结构。但是,只要一个系统是由三个或三个以上的要素所组成的,那么其中每两个要素之间的分布关系就不能独自构成系统的结构。这时候,不仅要考虑每两个要素之间的分布关系(在假设它们存在的情况下),而且要考虑各分布关系之间的分布关系(如在考虑 CO_2 、 CH_4 结构时需要考虑键角)。如在图 3—8(a)中,系统的结构不仅与 $A-B$ 、 $B-C$ 、 $C-A$ 有关,而且与这三者之间的分布关系有关。在(b)中,系统的结构与 $A-B$ 和 $B-C$ 之间的关系有关。在(c)中,系统的结构与 $B-C$ 、 $C-A$ 之间的关系有关。

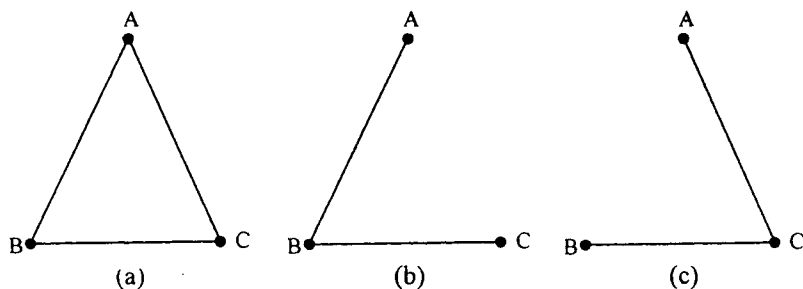


图 3—8 关系的关系

在复杂系统中,要素之间的分布关系和分布关系之间的分布关系不仅是多元的,而且通常是多层次的。这样,在复杂系统中,为了把握系统的结构,需要考虑要素之间的分布关系、分布关系之间的分布关系,或者说需要考虑 1 阶分布关系,2 阶分布关系, $\dots$, n 阶分布关系。在图 3—9 中可以看出这一点。

每一特定系统都有特定的结构。例如,核酸和蛋白质有不同的结构,细胞的结构不同于核酸和蛋白质的结构,多细胞生物体的结构不同于单个细胞的结构,生物群落的结构不同于单个生物体的结构,社会结构不同于各个人的结构。但是,不同系统在结构上的区别并

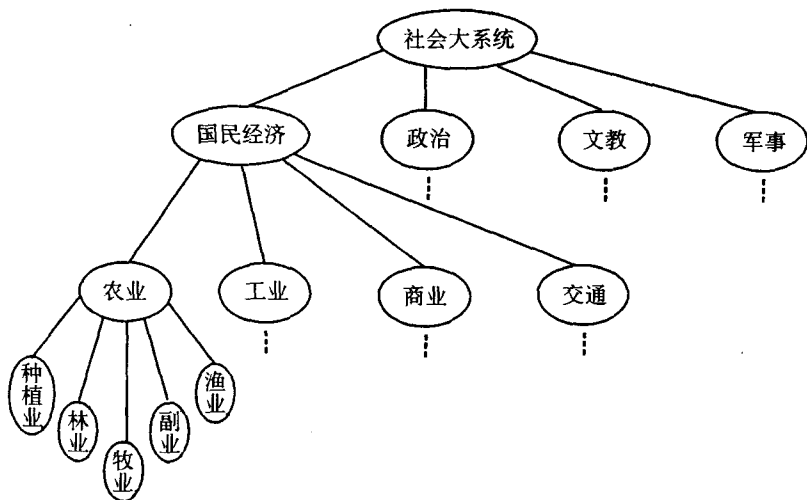


图 3—9 行业结构的层次性

周曼殊. 改革、开放与复杂系统. 长沙: 国防科技大学出版社, 1990. 43

不否定不同系统在结构上存在同型性的可能性, 这正是因为系统结构是系统内部各要素之间的分布关系的总体。

从系统结构的新定义出发, 我们可对传统的各种结构概念进行评述。从中可以发现, 有的人所说的“结构”实际上就是“系统”, 也就是说他们的“结构”概念将“功能”概念也包括在内; 有的人没有区分“结构”与“功能”概念, 也就是说在讨论某些系统时, 他们所说的“结构”与我们对“结构”的理解没有什么区别, 但是在讨论另一些问题时, 他们所说的“结构”与我们将要说的“功能”相同; 有的人把“功能”看作是“结构”的从属概念, 而不是同位概念。但是, 我们对结构的定义没有这种缺陷, 它可以把系统、结构和功能清楚地区分开来。

2. 结构与要素之间的关系

系统的结构以系统的要素为基础, 但是结构并非简单地由要素来决定, 而是取决于各要素及其分布关系。同时, 结构给要素以某些

新特征,使要素成为该系统的要素,以别于孤立存在的要素。结构与要素之间的关系可归纳为下列四种^①:

- (1) 结构的相对独立性;
- (2) 结构对要素的依赖性;
- (3) 要素的相对独立性;
- (4) 要素对结构的依赖性。

首先以原子为例考察结构与要素之间的关系。一个原子失去外层电子,就转化为离子,但原子结构不发生本质变化。这表明原子结构的相对独立性。这又从反面表示了要素的相对独立性。但离化原子是不稳定的,它吸收新的电子就能恢复成为稳定的原子,这表明结构对要素的依赖性。这又从反面表示,只要要素成其为要素,它就作为结构稳定性的因子依赖于结构。

下面,以生物体为例更细致地考察结构与要素之间的四种关系。

我们知道,由于新陈代谢,生物体的构成物质每时每刻都在发生变化。“个体在肉体上的同一性并非由于造成肉体的物质所致。使用示踪元素参与新陈代谢的现代方法表明:不仅是整个躯体的更新速度,而且是躯体的任一组成部分的更新速度,都远比我们长期以来所设想的可能速度大得多”。^② 对一个人来讲,过了一段时间之后,他的组成物质全都被换掉了,但他仍然是他,他的模式没有“变”,他的结构没有“变”。我们决不会因他的构成物质全都被新的物质替代而认不出他。正如维纳所说,“稳态所要保持的东西就是模式,它是我们个体的同一性的试金石。我们身体中的各种组织在我们活着的时候是变化着的;我们吃进去的食物和吸进去的空气变成我们身体中的血肉,而我们血肉中的暂时性因素同我们的排泄物一起每日排

① 岩崎允胤,宫原将平. 系统是结构与要素的统一. 哲学译丛. 1983. (2)

② 维纳. 人有人的用处. 北京:商务印书馆,1978. 79—80

出体外。我们无非是川流不息的江河中的漩涡。我们不是固定不变的质料,而是自身永存的模式”。^① 这就再清楚不过地指出了生物体结构的相对独立性。

系统的结构对于要素是相对独立的,但是结构的存在显然以要素为基础,依赖于要素的存在。曾经有个名叫卡西洛(N. Casillo)的人。他患有严重的持久性肠道堵塞,使得他吃什么吐什么,已经整整四年没有吃过一片食物,没有喝过一滴水。按常理讲,他早已不能活在人世上了。但是,他身高 1 米 79,体重 150 磅,身体健康,充满活力。原因在于:虽然他的肠胃已经失去作用,但是他采用了所谓“非肠胃性全食营养”疗法。一台供养机器代替他的肠胃向他提供他所需的全部营养。每到晚上,这部供养机器与他体内离心脏不远处的一根大静脉中的导管相接通。在他睡觉时,人体一天所需的各种各样的营养物就被泵入体内。到早晨他就与供养机分手,去上班工作,过着与正常人无所区别的生活。假如人们还没有造出这种机器,他可能早就与人世告别了,人体结构没有它赖以维持的营养是无法维持的,而如果没有特定的“要素”来履行提供人体所需营养的作用,人体就不可能得到这些营养。

在卡西洛的例子中,那部营养机已经成为他的人体结构的一部分。但是这部机器可以接通,也可以分离;它是具有独立性的。不过,能用来说明要素相对独立性的最好的例子,我们可在器官移植中看到。由于医学的发展,现在可以把一个人的器官移植到另一个人的身体上去。当我们惊奇地看到一个人的心脏可以被移植到另一个人的躯体内正常工作时,更令人惊奇的事情出现在眼前。那就是“换头术”的成功。^② 20 世纪 80 年代,一位苏联外科医生领导的医疗小

① 维纳. 人有人的用处. 北京:商务印书馆,1978. 79—80

② 齐汝.“换头术”取得成功. 上海科学生活. 1991. (2)

组成功地把一名癌症病人的头颅移植到了一名被判处死刑的罪犯身躯上。他们把被麻醉的罪犯身体移到一副维持生命的设备上去,随即把他的头颅切割下来。当他们发觉这具没有脑袋的身躯功能正常时,便把被麻醉的病人的头颅切割下来,移植到罪犯的身躯上去。这样,那位因患骨癌生命危在旦夕的病人得以延长了三年寿命,后来由于心脏病发作而死亡。在进行这次手术之前,他们曾经成功地把几只猩猩的头颅移植到另几只猩猩的身躯上。

但是,要素对结构的相对独立性并不否定要素对结构的依赖性。当人体的某些器官已停止了工作时,人体作为整体可能还活着,但是当人体作为整体已死去的时候,他的各个器官、各个细胞如果继续留在他的躯体内部,那么它们不久都要死掉,最终会腐烂发臭。生物体的各部分只有在生物体中才能保持稳态,才能在自然状态下保持“生命”。

总之,我们可在一切系统中发现结构与要素之间的上述四种关系。当然,由于各种具体系统的特征不同,这四种关系在不同系统中有不同的表现形式,但是这四种关系存在于任何系统却是肯定无疑的。

三、什么是功能

1. 活动关系与功能

系统内部各要素之间不仅有分布关系,而且有活动关系。活动关系表示要素活动之间的关系。这里,要素的活动是指要素的各种运动、变化或作用,而活动关系是指一要素的活动对其他要素活动的影响,一要素对其他要素的作用,或要素之间的相互作用、相互渗透、相互吸引或排斥等。先看几个实例。

(1) 在物质世界中,若干个物质粒子可以由自由状态结合为一个复合粒子,而复合粒子也可以分解为若干个自由粒子。在前一种情况下释放能量,而在后一种情况下吸收能量。这种能量称为结合

能。结合能的存在意味着物质系统内部要素之间的吸引作用。这显然属于这里所说的活动关系。现已知道：夸克由非常强的结合能结合成核子，中子和质子由核交换力结合成原子核。原子的外层电子由结合能被束缚于原子核。多个原子由离子键或共价键及其相对较弱的结合能结合成分子。在有机大分子内把化学分子结合在一起的结合能就更弱，而多细胞生物体内把细胞维系在一起的结合力就更微弱。在生态系统或社会系统中把生物物种或人结合在一起的那种结合力已经不是物理科学上的结合能，而是生态场或社会关系。在物理系统中要素之间的结合能(或结合力)的强度可在图 3—10 中看到。

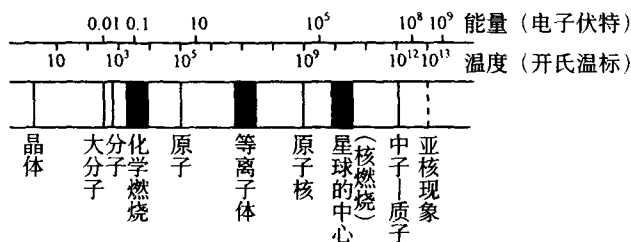


图 3—10 量子阶梯

李继宗等. 系统·信息·控制. 上海: 华东师范大学出版社, 1990. 152

(2) 生物体是一种稳态系统。生物体内各个器官、各个细胞处在不间断的运动中。这些细胞、这些器官的活动关系使得生物体保持稳态，保持生存。我们来看人体的体温调节。无论在炎热的夏天，还是在严寒的冬天，不管周围环境温度升到零上 40℃，还是降到零下 40℃，人的体温照样保持 37℃ 左右。这是由于人体有体温调节系统。人体体温保持相对恒定，靠的是人体产热与散热的动态平衡。在人体的代谢过程中，所产生能量的 1/3—1/4 消耗于机械、化学和电的运动中，而大部分能量最终以热能形式放出以维持体温。人体的产热器官主要是肌肉和肝脏。当外界温度下降时，肌肉的寒颤作

用增强,会产生更多的热。人体的散热主要是通过皮肤表面进行的。在皮肤上广泛分布着温度感受器。当外界温度变化时,温度感受器立即作出反应,发出信号直接反馈到下丘脑的温度控制器。通过对人体的蒸发、血管运动、内分泌和肌肉运动的调节,消除相应部位的温度偏离,维持体温相对恒定,如使头内部温度保持在 36.6°C 左右,皮肤温度保持在 34.1°C 左右,肌肉温度保持在 35.88°C 左右。图 3—11 表示这种体温调节过程。从中可知哪些部位参与这一调节过程,而这些部位的活动是怎样联系在一起的。

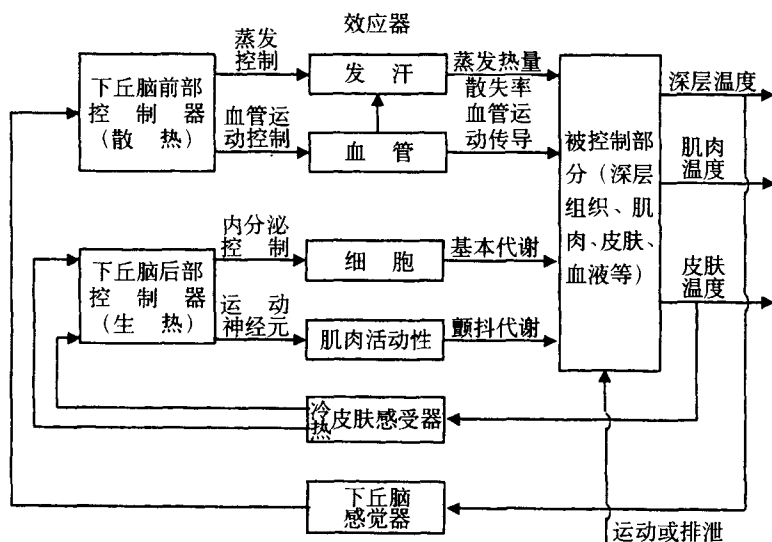


图 3—11 体温控制系统

涂序彦等编. 生物控制论. 北京: 科学出版社, 1980. 110

(3) 人类社会作为一种系统, 归根到底是由许多个人组成的, 这些个人在社会系统中处在这样那样的分布关系中。但是, 与个人的社会地位一样, 个人在社会系统中的活动也是十分有趣的。如恩格斯所说, 与自然系统不同, “在社会历史领域内进行活动的, 全是

具有意识的、经过思虑或凭激情行动的、追求某种目的的人;任何事情的发生都不是没有自觉的意图,没有预期的目的的”。“人们通过每一个人追求他自己的、自觉期望的目的而创造自己的历史,却不管这种历史的结局如何,而这许多按不同方向活动的愿望及其对外部世界的各种各样影响所产生的结果,就是历史。因此,问题也在于,这许多个别的人所期望的是什么。愿望是由激情或思虑来决定的。而直接决定激情或思虑的杠杆是各式各样的。有的可能是外界的事物,有的可能是精神方面的动机,如功名心、‘对真理和正义的热忱’、个人的憎恶,或者甚至是各种纯粹个人的怪癖”。但是,“人们所期望的东西很少如愿以偿,许多预期的目的在大多数场合都彼此冲突,互相矛盾……行动的目的是预期的,但是行动实际产生的结果并不是预期的”。^① 这样,历史似乎是纯粹偶然事件的堆积。

但是,历史有自己的规律,社会有自己的秩序。历史的规律和社会的秩序是由社会内部各种活动的相互关系形成的。在社会系统中,每个人是自己活动的主体,但是每个人并非总是作为完全“自由”的个人活动着。个人的活动结合成群体的活动,群体的活动结合成社会组织的活动,社会组织的活动结合成社区的活动,而社区的活动最终结合成整个社会的活动。社会的活动又分成政治活动、经济活动和文化活动。这样,在社会活动的不同层次和不同领域形成不同的活动承担者。如克劳斯(Georg Klaus, 1912—1974)提出的社会总过程的控制论模型,在图3—12中,我们可以看到社会内部各种活动的相互关系,而我们又可以轻而易举地找出各种社会活动的承担者。正是这些活动承担者即行动者的活动关系主宰着社会的秩序,主持着历史的进程。

^① 马克思恩格斯选集(第4卷). 北京:人民出版社,1966. 227—228

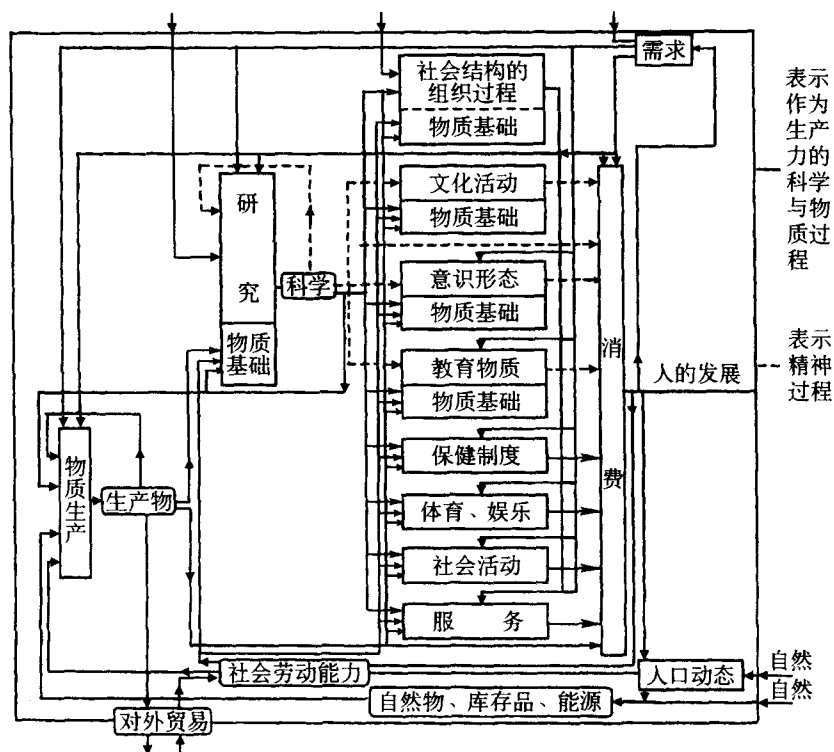


图 3—12 社会总过程的控制论模型

クラウス(Klaus)G. サイバネティックスと社会科学. 東京:合同出版,1978. 179

(4) 在数学中,各种各样的运算和变换所表示的是数学量之间的活动关系。例如,在集合的运算中,可以从给定的一个或两个集合得出新的集合。集合 A 与集合 B 通过交($A \cap B$)、并($A \cup B$)、差($A - B$)、余($\bar{A}$)可得到新的结果,如图 3—13 的阴影部分所示。

又如,在数学上,如果按照某个对应规则 σ ,令集合 A 的每一个元素在集合 B 中有一个(或多个)确定元素与它对应,则称对应规则 σ 为从 A 到 B 的变换。对应规则 σ 相当于数学分析中所说的函数。

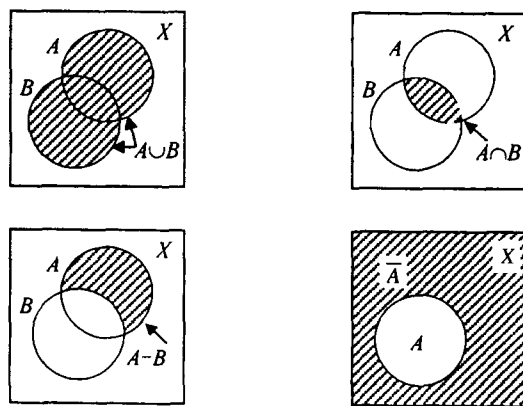


图 3—13 文氏图

即 $\sigma(a) = b$ 或 $\sigma: a \rightarrow b$ 。设整数集 A 上的函数

$$y = x^2 = f(x) \quad (2.8)$$

这是 A 到 A 里的一个映射,也是 A 到 $B = \{x \mid \text{自然数的平方和 } 0\}$ 上的一个映射,如图 3—14 所示。

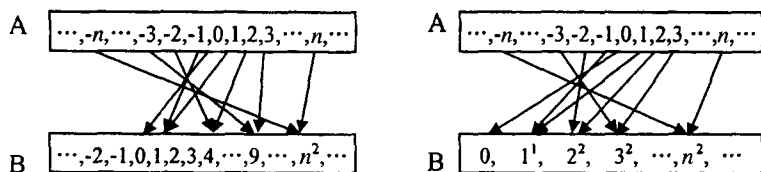


图 3—14 映射

除以上几个例子之外,还可以在其他各种具体系统中发现各要素之间的活动关系。这样,我们可以从系统要素之间的活动关系的概念出发引入系统功能概念。在使各要素的集合成为系统的各种关系中,我们把各要素之间的全部活动关系的总体称为系统的功能。在不同的具体系统中,要素之间的活动关系可能是物质上的,能量上的,信息上的,概念上的,或逻辑上的。与此对应,就会有各方面的系统功能。

系统的功能是系统各要素之间活动关系的总体,而不是单个的活动关系。例如,当我们从功能角度上考察一个原子时,不仅要考察核子与电子之间的活动关系,而且要考察核子之间、电子之间的活动关系。当我们考察生物体的功能时,需要考察器官与器官之间的各种活动关系以及各种活动关系之间的活动关系。

与结构的情况相类似,在复杂系统中,要素之间的活动关系和活动关系之间的活动关系不仅是多元的,而且通常是多层次的。这样,为了把握复杂系统的功能,需要考虑要素之间的活动关系、活动关系之间的活动关系,或者说需要考虑1阶活动关系,2阶活动关系, $\dots$, n 阶活动关系。例如在图3—15中可以看出地球上的熵处理功能的层次性。

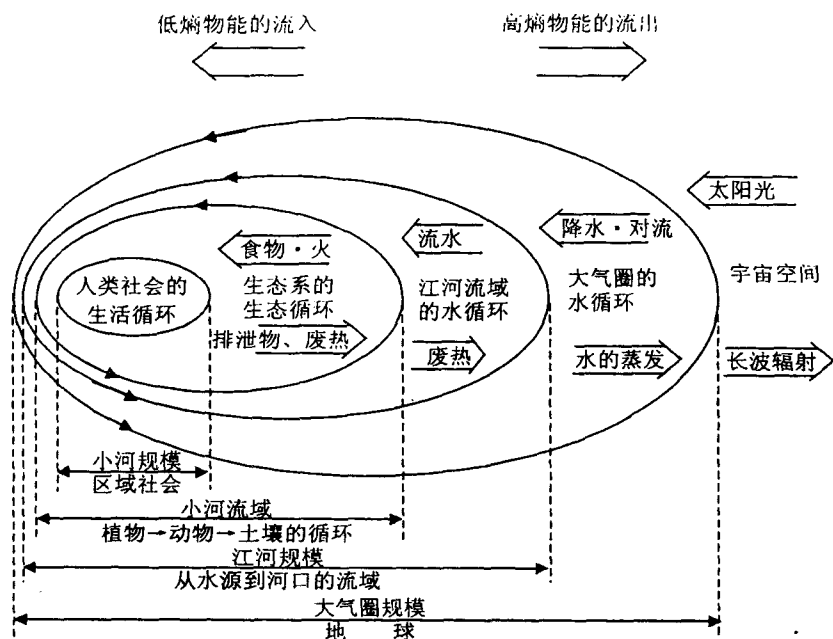


图3—15 地球上的熵处理过程

室田武, エネルギーとエントロピーの経済学, 東京: 東洋経済新報社, 1979

每一特定系统都有特定的功能。例如,核酸和蛋白质有不同的功能,细胞的功能不同于核酸和蛋白质的功能,多细胞生物体的功能不同于单个细胞的功能,生物群落的功能不同于单个生物体的功能,社会系统的功能不同于各个人的功能。但是,不同系统在功能上的异质性并不否定不同系统在功能上存在同型性的可能性,这也是因为系统功能是系统内部各要素之间的活动关系的总体。

如果我们更细致地考察功能概念,就可以从三个方面理解系统的功能。

首先,所谓功能,是系统把所接受的作用(输入)转换为对环境作用(输出)的方式。这种转换机制也就是系统内部各种活动关系的总体。也就是说,这里所给出的功能定义和前面所给出的功能定义是一致的。

任何现实系统都受到来自环境的某种作用,并对这种作用作出某种反应。一般来讲,系统对外部作用的反应并不像力学上刚体对作用的反作用那样简单,那样直接,而是通过系统内部要素之间的活动关系作出反应。系统用某种转换规则把输入转换成输出。因此,输出在内容上和形式上可能与输入大不一样。例如,植物在光合作用中用光能、水和二氧化碳造出葡萄糖和氧气,并排出废热废物。动物在新陈代谢过程中,吸入水和各种食物,进行自我更新,并排出粪便和废热等。

图3—16所示的是产业机器人模型。产业机器人在工厂自动化系统中起核心作用。通常,产业机器人由五个部分组成,那就是操作装置(机械手)、传感器、控制器、动力变换装置和电脑。这五个部分各有自己独特的部分功能,并密切联系在一起,形成产业机器人的整体功能。

机械手相当于人的手臂,产业机器人用机械手搬运东西或进行

精巧的装配工作。机械手的底部接在躯体上,并有臂、腕、手(即末端效应器)等部位。机械手可以六个自由度自由活动,有直角坐标型、圆桶坐标型、极坐标型、多关节型等。

传感器相当于人眼,它可接收来自外部的信息。有代表性的传感器有用来感知机械手状态的光学感知仪、测位仪、测速仪和用来观察机械手周围状态的摄像机。其中,光学感知仪和测位仪用于测出机械手关节位置,测速仪用于测出关节速度。

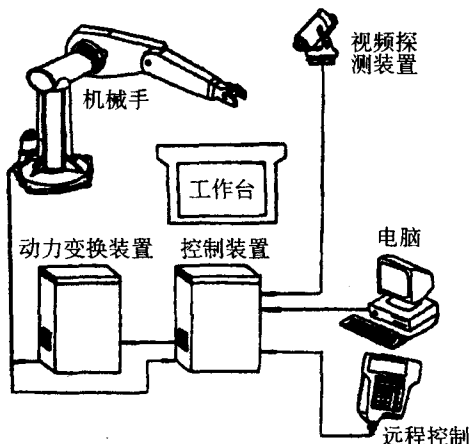


图 3—16 产业机器人模型

控制器负责处理机器人通过传感器接收的各种

资料。如果机械手在工作过程中由于其本身的机械性能或外来障碍而不能正常工作时,传感器就把这一情况报告给控制器,而控制器就加以修正,使机械手正常工作。近来,由于微处理机的发展,机器人可以快速修正机械手的微小错误。

动力变换装置提供机械手所需动力。机械手的关节是由电动机驱动的,通常用直流电动机、交流电动机或步进电动机等。它们根据电信号即电流工作。所以,动力变换装置可视为把由控制器加以修正的闭环信号转变为电信号的装置。

电脑更是一个不可缺少的组成部分。机器人的机械手并不是随便活动的,而是按照规定的指令进行各种动作。人们通常把产业机器人看作是能重复进行程序化动作,来完成各种任务的机械手。电脑使产业机器人按照预先编好的程序有步骤地进行各种工作。

这样,产业机器人在这五个部分的相互协调之下进行工作,并修正工作中的差错。

第二,系统功能的又一含义是指在各要素的相互作用中产生的效能总体。

例如,电子计算机有数值运算、信息存贮、数据处理、逻辑判断等能力,这些能力构成电子计算机的功能。

动物的各器官系统有其特定的功能。骨骼—肌肉系统有运动、支持和保护功能,消化系统有摄取食物、消化、吸收养分、排除废物等功能,呼吸系统有进行气体交换的功能,循环系统有输送氧气、二氧化碳和养分、代谢废物的功能,排泄系统有收集水分、含痰废物及其他物质并把它们排出体外的功能,生殖系统有繁殖后代的功能,神经系统有接受刺激、对刺激产生有规律的反应的功能。所有这些器官系统功能的总体就构成动物的整体功能。这一整体功能是在各器官系统的活动关系的相互联系和配合中形成的。

第三,在与环境的关系中表现出来的系统功能,称为系统的行为。即是说,系统功能的外部表现、系统对环境的作用就是系统的行为。

在第一和第二中谈到的系统功能是内在于系统的,它们可以潜在的形式存在,不表现为行为。例如,一个生物体对某种刺激作出反应的内部机制并不显露在外部;一台电子计算机当它不运行时虽然它的功能依然如故,但并不表现出来;一个人当他由于某种原因而被限制住的时候,他的很多才华无法充分显示出来。

系统的功能只有在适当的环境中才能表现出来,表现为行为。当然,在与环境的关系中,系统(特别是具有主体性或能动性的系统)并不总是被动的,它可以改造环境,创造出能适于发挥其功能的环境。

在考察系统行为时,我们可以不考虑系统将输入转换为输出的

转换机制,只考虑输入—输出关系或转换结果。但这并不意味着系统功能是指系统与外界环境之间的关系,指系统的外部作用。系统功能是系统本身所具有的能力,并不是由系统与环境的而产生的。例如,一台电子计算机的功能,或一个生物体的功能,均为这些系统所固有。当然,系统的功能要在与环境的相互作用中,在系统的输入—输出关系中得到表现。

2. 功能与要素活动之间的关系

系统的功能以要素的活动为基础,但是功能并非简单地由要素活动来决定,而是取决于各要素及其活动关系。同时,功能给要素活动以某些新特征,使要素活动成为该系统中的要素活动,与孤立发生的要素活动相区别。

系统功能与要素活动之间的关系可归纳为下列四种:

- (1) 系统功能的相对独立性;
- (2) 系统功能对要素活动的依赖性;
- (3) 要素活动的相对独立性;
- (4) 要素活动对系统功能的依赖性。

系统功能对要素活动的依赖性 is 显而易见的。既然系统功能被定义为要素活动关系的总体,如无要素活动,就不可能有系统功能。例如,如无社会个人的各种活动,社会的各种功能是不可想象的。

但是,系统功能一旦形成,就具有相对独立性。个别要素活动的偏离、停止或丧失,未必影响或改变整个系统的整体功能。尤其在复杂系统中,如果要素活动之间存在着并联关系,并形成—个网络,那么个别要素活动对系统整体功能的直接作用更为淡薄,系统功能的相对独立性更为明显。例如,如果说在极权社会(奴隶社会、封建社会、法西斯主义社会以及其他形形色色的极权社会)中,还有一种假象,即某个最高统治者的存在是社会赖以发挥其正常功能的先决条

件,那么在民主社会中,最高统治者的依次更替已成为社会正常发挥其功能的一个必要条件。社会有自己的发展规律,它决不会因统治者的更换而改变自己的航向。

要素活动对系统功能的依赖性也是明显的。要素在系统中的活动终究要受制于系统功能,为实现系统功能服务。例如,人脑归根结底是由分子、原子和各种基本粒子构成的,这些物质在人脑中的活动能产生大脑的思维功能,但它们在其他系统中的活动却无法产生人脑的思维功能。这就表明这些物质在大脑中的活动受着人脑功能的制约,为人脑功能服务。

但是,要素活动对系统功能的依赖性也不否定要素活动的相对独立性。一般来讲,要素活动不同于系统功能,这就使要素活动在总体上服从于系统功能的前提下具有相对独立性。此外,一要素在一系统中的活动不同于它在另一系统中的活动,一要素在离开它所在的系统时就会以其他方式进行某种活动。这就表明要素活动的相对独立性。

3.2.3 结构与功能的关系

在近代科学的传统中,科学研究被分为对世界的结构方面的研究和功能方面的研究。例如,生物学被分为形态学和生理学,前者主要研究生物体的结构和形态,其中包括分类学、解剖学、组织学、细胞学、胚胎学等;后者主要研究活的生物体中发生的过程和功能,如代谢、行为、形态发生等。为了全面地了解生物界,需要把这两种研究有机地结合起来。一般地说,结构研究和功能研究,是研究同一对象系统的互异和互补的两种措施。随着系统学的发展,这两种研究的统一日见重要。

为把结构研究和功能研究统一起来,需要从理论上全面地正确地把握结构与功能之间的多种关系。实际上,人们在系统学和其他

科学领域已对结构与功能的关系问题做了大量研究。但是,由于对结构与功能的认识存在着不同观点,在结构与功能的关系问题上 also 存在着各种不同观点。

下面,我将先介绍一些国外学者对结构与功能关系的观点,然后阐述我对这个问题的观点。

一、结构与功能的关系:值得借鉴的几种观点^①

1. 结构与功能是不是成对概念

在结构与功能关系上,人们通常把这两者看成是成对概念。最典型的是社会学中的“结构功能分析”。在一般系统理论领域,克里尔认为“结构”是与“关系”成对的概念。此外,还有一些学者认为,对结构方面的研究对应于下表的左项,而对功能方面的研究对应于下表的右项。

(1) 存在(的排列)	对	活动(过程)
汇	对	流
性状(生物)	对	行为(行动)
器官(生物)	对	生命过程
解剖学	对	生理学
(2) 静态	对	动态
不变	对	可变
(3) 内部(深层)	对	外部(表层)
潜在	对	显在
不可观察	对	可观察
无意识	对	有意识
(4) 模式	对	混乱

^① 公文俊平,高原康彦(编).一般システム研究の成果と展望.横浜:日本GSR研究会,1987.195—196,208—210,212—213

有规则	对	无规则、随机
有序	对	无序
排列	对	混乱
有规律	对	无规律
制约	对	自由
(5) 整体	对	部分、要素
(6) 客观	对	主观
事实	对	价值
实在	对	理念
控制	对	达到目标
(7) 模型	对	现实
解释手段	对	解释对象
解释项	对	被解释项
外生变量	对	内生变量
自变量	对	因变量

在以上的各对概念中,当把它们理解为结构方面和功能方面时,有些是合理的,但另一些则不大合理。尤其在上表的右边,把“功能”理解为与“无序、无规则、无规律、混乱”等有关的概念是不能接受的,因为无论是结构还是功能,都体现着某种有序性。同时,把“结构”与“功能”的区别看作是“实体”与“关系”、“存在”与“活动”的区分的看法也是难以认同的,这不仅是因为离开“关系”的结构或离开“实体”的功能是不可思议的,而且是因为离开“活动”的“存在”或离开“存在”的“活动”也是不可思议的。但是,把结构与功能当作相互对应的一对概念,却为正确认识两者的关系提供了有益的启示。

2. 阿科夫与埃莫里的观点

系统科学家阿科夫与埃莫里(F. E. Emery)对结构与功能关系的观点是值得介绍的。他们认为,“结构”与“功能”是为认识世界所

需的两个互补的“观点”,对于同一个概念(如时间、空间、点、直线等)既可以从结构上定义,亦可以从功能上定义。而且,既可以基于结构观点定义的各种概念为基础,描述基于功能观点的世界图景,也可以基于功能观点定义的各种概念为基础,描述基于结构观点的世界图景。形式科学和物理科学从结构观点出发认识世界,而行为科学则从功能观点出发认识世界。

在此,所谓结构观点是指:就整体系统的框架而言,考虑四维时空及其中的各点(或其集合);就各点(力学上的点)而言,考虑它们所具有的“几何学属性”、“运动学属性”、“力学属性(质量、加速度等)”。若干个力学点的集合为“物理个体”,而可表现为上述三种属性的函数的便是“物理属性”。当把任意物理属性当作变量时,在其定义域的各元素中,对观察者来讲无需加以区分而被总括地当作等值的,就称为“形态属性”。这时,“结构属性”是指上述各种属性的总称,“结构个体(对象)”是指具有一个以上结构属性的物理个体,并把具有一个以上结构属性的结构个体的集合称为“结构类”。

阿科夫和埃莫里在此并没有给出“结构”概念的定义,但是从以上的介绍中可知,他们所说的“结构”是“结构个体”或“结构属性”的简称。

在讨论功能观点时,他们先定义了把因果关系中的原因和结果分割为若干个部分而得到的“产出关系”。所谓产出关系,是产者与产物之间的关系,一个产物有多个产者分别作为其必要条件与之相对应,而一个产者又作为多个产物的产者发挥作用。这样,他们所说的“功能”,着眼于特定产物的产出,表示产者的作用,而他们的“功能观点”不仅适用于产者,而且适用于产物。因此,他们的“功能观点”是目的论观点,是超越了“存在”与“活动”之两分法的观点。

在论及“结构观点”与“功能观点”的关系时,他们认为:不能把其中的一种观点看作是另一种观点的基础;两种观点之间不存在谁先

谁后的关系。

从上可知,阿科夫和埃莫里已经正确地把握了结构概念与功能概念的互补性,并为正确阐述结构与功能之间的动态关系提出了十分有益的观点。但是,他们在定义结构与功能时未能给出共同的概念基础,所以还是未能清楚地解释两者的关系。

3. 芮克里夫-布朗的观点

社会人类学家、结构功能主义者芮克里夫-布朗在他的理论中使用三个基础概念:过程、结构、功能。“过程(社会过程)”形成个人或群体的相互作用的系统(社会系统),表示一定的规则性。所谓“结构”,是指“各部分或各成分的有序配置”,即“实在的各单元之间各种关系的集合”,而不是指单元本身(例如,构成人体的分子不断更换,但人体结构可保持不变)。“过程”(即结成关系的各单元的“活动”)依赖于“结构”,而“结构的持续性”依赖于“过程”。所谓“功能”,是指“结构”与“过程”之间的这种“相关关系”。就有机体而言,“功能”使有机体各部分的活动与整个有机体持续生存的必要条件(结构的存续)相一致。或者,“功能”表示“各部分的活动对整体活动的贡献”。显然,这里的“功能”定义与“生理功能”的定义相同。

当用这些概念来研究社会系统时,芮克里夫-布朗承认有些困难之处。例如,与生物不同,在历史过程中,社会“在不中断其持续性的情况下改变其结构形式”。更深刻更重要的问题则在于:即使不考虑生物有机体的功能,也可以在某种程度上观察并研究社会的结构,但是就构成结构的各种社会关系中的大部分(诸如父母与子女、卖者与买者、统治者与被统治者)关系而言,则不可能离开这些关系发挥其作用的社会关系去考察它们。

这里,将过程概念用于研究系统、结构、功能显然非常重要,但是芮克里夫-布朗在使用这些概念时表现出一些混乱。为了消除这些混乱,必须超越具体科学领域,进入一般科学领域。

二、结构与功能的关系:新的探索

从以上的介绍中可以看出,结构与功能的关系问题尚未得到令人满意的解决。下面,我要从我自己关于结构概念与功能概念的理解出发具体地(而不是抽象地)考察结构与功能之间的各种关系。

在我的概念体系中,由于系统的结构被视为系统各要素的分布关系的总体,而系统的功能被视为系统各要素的活动关系的总体,系统结构与系统功能是一对同位概念,而不是具有主从关系的两个概念。并且,在下面的叙述中我既举动态系统的例子,也举静态系统的例子,但从总体上讲,我把动态系统看成系统的一般情形,把静态系统看成一种特例(对此两个概念,将在第四章给出详细解释)。

1. 系统结构决定系统功能

不论在各种静态系统中,还是在各种动态系统中,都不难发现系统功能取决于系统结构是一种普遍现象。例如,细胞的结构决定其各种生理功能,器官的结构决定其生理功能,生物体结构决定其生理功能,社会结构决定社会功能,等等。在机器中,我们能最容易地看出系统结构决定系统功能。

现以铰链四杆机构为例。平面连杆机构是由若干刚性构件用低副连接而成的机构,广泛应用于各种机械和仪表中。平面连杆机构中结构最简单、应用最广泛的是四杆机构。所有运动副全为转动副的四杆机构称为铰链四杆机构,如图 3—17 所示。

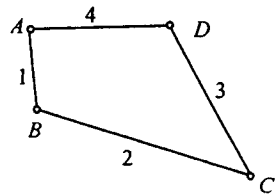
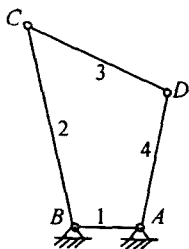
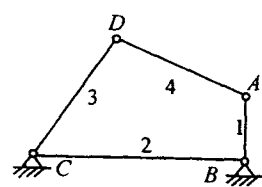


图 3—17 铰链四杆机构

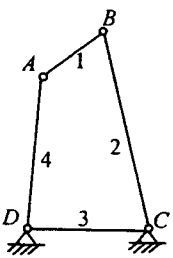
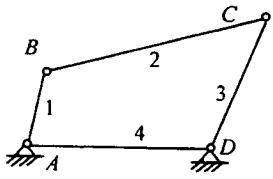
设构件 1 是最短构件,构件 2 为最长构件,并且构件 1 与构件 2 的长度之和小于或等于构件 3 与构件 4 的长度之和。当我们取不同构件作机架

时,这个四杆机构就具有不同结构,从而具有不同的功能。表 3.2 表示在四种情况下各构件的活动情况和整个机构的功能。按功能上的差异,这些机构分成双曲柄机构、曲柄摇杆机构和双摇杆机构。在曲柄摇杆机构中,既可以把转动转化为摆动,亦可以把摆动转化为转动。在具体情况下得以实现的究竟是哪一种转化,取决于输入力作用于哪一个构件上。当以构件 4 为机架时,如果输入力驱动的是构件 1,就可以把转动转化为摆动;如果输入力驱动的是构件 3,则可以把摆动转化为转动。从系统内部来讲,要素活动的次序的变化导致系统功能的变化,如同要素排列次序的变化导致系统结构的变化一样。但是,无论在何种情况下,铰链四杆机构的结构决定其功能却是肯定无疑的。

表 3.2 铰链四杆机构的结构与功能

图 形	机 架	各构件活动	功 能	类 型
	构件 1	构件 2, 4 以 B, A 点为圆心作圆周运动; 构件 3 作平面运动。	转动 $\rightleftharpoons$ 转动	双曲柄机构
	构件 2	构件 1 以 B 点为圆心作圆周运动; 构件 3 绕 C 点摆动; 构件 4 作平面运动。	转动 $\rightleftharpoons$ 摆动	曲柄摇杆机构

(续表)

图 形	机 架	各构件活动	功 能	类 型
	构件 3	构件 2, 4 绕 C, D 点摆动; 构件 1 作平面运动。	摆动 $\leftrightarrow$ 摆动	双摇杆机构
	构件 4	构件 1 以 A 点为圆心作圆周运动; 构件 3 绕 D 点摆动; 构件 2 作平面运动。	转动 $\leftrightarrow$ 摆动	曲柄摇杆机构

2. 系统功能决定系统结构

在系统结构与系统功能的关系上,“系统结构决定系统功能”是不难理解的,但是“系统功能决定系统结构”并不是显而易见的,以至于有的学者忽视或反对“系统功能决定系统结构”的原理。

当我们说“系统结构决定系统功能”时,我们是以某一系统结构的存在为前提的。但是,只要我们关心“这些系统结构是怎样产生和存在的”这样一个问题,就不难发现这些系统结构的产生和存在依赖于其功能,某种意义上甚至可以说系统功能决定系统结构,或者说系统内部各要素的分布关系取决于各要素的活动关系。下面看几个典型实例。

(1) 生物体结构的维持依赖于其功能。生物体的结构执行着各

种生理功能,而这些生理功能又在支持生物体结构的维持。生物体的生理功能一旦停止,生物体就死亡,最终导致生物体结构的瓦解。在生物体中,要素的不断活动和(或)不断更换是生物体结构赖以存在的必要条件。例如,细胞在它内部化合物的分解和化合中维持其结构;生物体在它内部细胞的活动、死亡、再生中,在不间断的新陈代谢过程中维持其结构;一个物种的结构依赖于其生物个体的出生、生长、衰老、死亡和繁殖活动。

(2) 在生物进化中,新结构的起源与生物体的功能联系在一起。总的来说,生物在自然选择的作用下,通过基因突变、基因重组和染色体畸变,逐渐发展出新的结构。这里有三种基本方式。

第一,新结构是基因多效性的副产品。在基因和性状之间除有“多因一效”(即许多基因影响到同一性状)现象,还有“一因多效”(即一个基因影响到许多性状)现象。例如,水稻矮生型基因一般使水稻分蘖力强,叶色深,叶绿素含量较高,而且使栅栏细胞直径较大。果蝇的白眼基因不仅影响到眼睛的颜色,而且影响到受精囊的形状和颜色。果蝇三角形翅脉基因,不仅使翅上纵脉与边缘脉连接处呈三角形膨大,而且使眼睛长得小些,粗糙些,同时使刚毛也发生一些变化。在整个生物界,基因多效性是较普遍的现象。

由于基因有多效性,一个基因会影响多种性状。如果一个基因对某一性状的影响提高了选择价值,那么对其他性状的影响是否提高其选择价值可能并不重要。但是在进化过程中,由于环境的改变,基因多效性的某些部分可能获得新的选择价值,成为有用的结构,并成为进一步发展的基础。例如,犀牛祖先前额上的第一个隆起部,可能是某些基因多效性的副产物。它起初没有什么用处,但最终发展成精致锋利的犀牛角。

第二,生物体器官某些原有功能的强化是新器官、新结构起源的重要方式。例如,奔跑功能的强化,使哺乳类的五趾肢转化成鹿的双

蹄肢和马的单蹄肢。图 3—18 表示马前肢的进化过程。又如,原先分散的单个分泌细胞,由于分泌功能的强化,最终产生腺体。视神经功能的强化最终导致眼睛的产生。

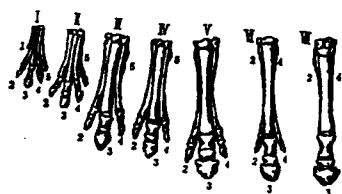


图 3—18 马前肢的进化

由多趾到单趾 I 是前始祖马前肢的骨,表示多趾;IV 是现代马前肢的骨,表示单趾。可以看到第三趾的发展

第三,新结构起源的最重要的方式是功能的改变。例如,鸟类砂囊的前身是脊椎动物的未特化的胃。未特化的胃除了贮存食物的功能外还有两种基本功能。其一是分泌胃液,其二是搅拌胃内食物。为此,胃有管分泌的腺和管收缩的肌肉纤维。在进化过程中,胃各部分的功能可能发生分化,胃的一部分主要用于分泌胃液,另一部分主要用于搅拌食物。砂囊可能就是从后者变化而成的。又如,蜂类的产卵器变成针,脊索动物的内柱变成甲状腺,古总鳍鱼的鳔变成肺,这些都是功能变化导致结构变化的结果。原来,古总鳍鱼的呼吸器官有两种,即鳃和鳔。其中,鳃是主要的呼吸器官,鳔是辅助的呼吸器官。在鱼类到两栖类的进化过程中,由于上陆生活,鳔的呼吸功能得到发展,最终发展成肺。在两栖类的成体时期,鳃已消失,肺就成为重要的呼吸器官。

(3) 在各种人工器物的设计与制作过程中,“系统功能决定系统结构”的原理起着支配作用。各种人工器物(如房屋、服装、机器、电子计算机等)一般来说是人们为了实现仅靠人体器官不能或难以实现的功能而设计和制作出来的,并且制作出来后为实现这些功能服务。也就是说,在人造器物的发展史上,一般来说,功能上的需要先于结构的实现,而且结构是为功能服务的。因此,在生物进化中像生物体朝着有利于适应环境的结构方向发展一样,人工器物总是朝着能实现最优功能的最优结构方向发展。

当然,在每一个历史时期,人们对人工器物所提出的功能要求是以当时已存在的人工器物为基础的。已有人工器物的结构决定其功能,并产生人们对新功能的欲望。但是新功能并不是旧结构的直接产物。因此,在人工器物结构与功能之间相互依赖关系的发展中,起主导作用的是功能,而不是结构。

(4) 在各类系统中形成被称为“耗散结构”的宏观模式的进化过程中,同样可以发现“功能决定结构”的原理起着支配作用。例如,在不变的重力场中,从下面加热某一流体薄层。当流体的下界面为金属平板,上界面为自由面,即流体的上表面上没有覆盖任何平板时,在一定条件下就能观察到流体表面上出现六角形花纹(见图 7—10)。这时,液体不断从下表面吸收热量,又不断从上表面放出热量。在六角形中心液体向上流动,在边缘液体向下流动。液体分子的这种集体运动决定液体的宏观模式。如果外界提供的热量增大或减少,或者液体上表面的放热机制发生变化,那么液体分子的集体运动状况就发生变化,从而液体的宏观模式也要发生变化。大量动态开放系统的研究表明,系统结构的形成、存在与变化依赖于系统内部以及系统与环境之间的物流和能流,决定于系统的功能状况。

从上可知,根据我们考察问题的角度不同,系统结构与系统功能之间既存在着“系统结构决定系统功能”的一面,又存在着“系统功能决定系统结构”的一面。由此我们可以进一步认为:在动态开放系统中,结构的维持以其要素的不断更换为先决条件,而这些要素的流动方式又取决于当时的结构;结构与功能互为前提,互为因果;结构转化为功能,功能转化为结构。系统结构与系统功能是统一的,而系统结构与系统功能的变化乃是统一的系统变化的不可分割的两个侧面。系统结构与系统功能的统一在于系统过程。即是说,我们可以用系统过程概念给系统结构和系统功能以统一的描述。正如贝塔朗菲所说:如果说功能是短暂而迅速的过程,结构则是长期而缓慢的过

程。“结构(即部分的秩序)和功能(过程的秩序)也许完全是一回事:在物理世界中物质分解为能量的活动,而在生物世界里结构就是过程流的表现。”^①或者,正如恩格斯所说:“世界不是一成不变的事物的集合体,而是过程的集合体。”^②在这个意义上,可以说系统是过程,是连续不断的流。

3. 系统结构与系统功能之间的多重对应关系

系统结构与系统功能之间存在着动态的辩证的相互依赖关系。除此之外,正确地把握系统结构与系统功能之间的多重对应关系也是非常重要的。在一些系统中,其结构与功能之间存在着——对应关系,一种结构对应于一种功能,而一种功能对应于一种结构。但是,我们在大量具体系统中可观察到“一种结构多种功能”现象与“一种功能多种结构”的现象。

(1) 一种结构多种功能

说“结构决定功能”并不是指一种结构只能有一种功能。在现实中,一种结构实行多种功能的现象屡见不鲜,俯拾皆是。

首先看阿米巴。阿米巴是一种最简单的单细胞生物,它由细胞质和细胞核组成,周围由细胞膜包围着。这就是阿米巴的全部结构。阿米巴靠这样一种简单的结构,完成生命体所需的全部功能,如摄取、运动、呼吸、排泄、繁殖等。最有趣的是所谓假足。它不是专门的运动器官,也不是专门的摄取器官,但是它能完成运动功能和捕食功能。阿米巴在静止休息的时候,呈盘状,没有假足。当阿米巴开始移动的时候,就伸出突起,细胞质就向那突起的方向流动,那突起越伸越长,形成假足。由于后部的细胞质往这个假足方向流动,其他位置上的假足被收了回来,阿米巴就可以在这种一伸一缩的过程中向前

① Bertalanffy L. v. *General System Theory*, 1968. 27

② 马克思恩格斯选集(第4卷),224

移动。假足不仅有“足”的功能,而且有“手”的功能。当阿米巴碰到细菌、衣藻或食物小颗粒时,它会向食物伸出假足,用假足把食物包围起来,并纳入体内,加以分解消化,见图 3—19。此例足以表明阿

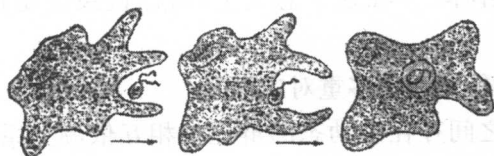


图 3—19 变形虫的假足与捕食功能

米巴的结构可以实行多种功能。此例还表明:阿米巴假足是功能需要的产物;当阿米巴需要运动或捕食时,就产生出假足,而没有这种功

能需要时,假足就消失。也就是说,像阿米巴这样的原始生物中,功能需要产生相应结构,虽然它不是固定的结构形式。“功能决定结构”的原理在这里又一次得到了说明。

又如在社会生活中,一个人在学校讲课时,他是教师;在商店里,他是一个消费者;在家庭的厨房里,他是一个炊事员;在孩子面前,他是一个父亲。在所有这些不同情况下,他自身的结构并没有发生什么变化。有深刻社会意义的现象是人们在社会生产活动中的分工及其发展变化。在原始社会,除了男女之间的自然分工外,几乎不存在其他任何分工,因此一个人往往同时承担农夫、猎人、渔民、工匠、战士等多方面的职能。这与近代社会和现代社会中一个人被固定在单一职业的畸形现象形成了鲜明的对照。一般地说,在迄今为止的社会形态中,社会越是落后,在其成员中“一种结构多种功能”的现象越发严重。随着社会的发展,结构与功能的对应关系日益严格起来,直至使工人沦为机器的单纯附属品,即分工的奴隶。这是社会发展的结果,又是社会发展的动因;这是促进人的发展的一个先决条件,但又成为阻碍人的发展的一个社会弊端。按照马克思和恩格斯的预言,在未来的共产主义社会里,人类将在新的基础上恢复“一种结构多种功能”的现象,但不是由于生产力的落后,而是由于生产力的高度发达;不是由于

人的愚昧无知和软弱,而是由于人的全面发展。

一种系统结构往往内在地具有多种功能。但是在每一个具体情况下,它究竟发挥哪一种功能,通常取决于当时的具体环境。由于环境不同,该系统将接收不同的输入,产生不同的输出,而系统内部从输入到输出的转换方式也随之发生变化。另一方面,在不同的环境中,一个系统所发挥的功能在量的方面也大不相同。例如,同样一个人在一种社会环境下可能碌碌无为,虚度一生,而在另一种社会环境下可能大有作为,卓有成就。问题的关键在于前一种环境压抑这个人的最优功能,而后一种环境却使他处于最优功能状态。

还需要指出的是,当我们说一种结构实行多种功能时,是就系统整体的结构而言的。但是,在每个具体情况下,实际起作用的要素或微观结构可能大不相同。例如,一台多功能机器在完成某一特定功能时,实际起作用的并不是机器的整体,而是机器的某一个零件或部件以及与之有关的部分,其他零件、部件或部分却处于“休息”状态。

(2) 一种功能多种结构

说“功能决定结构”也不是指与一种功能相对应的结构只能有一种。在现实世界中,某一种功能通常可以由多种结构来承担。这在生命系统的子系统—分系统表中很容易得知。在各种人造器物中,“一种功能多种结构”的现象同样不胜枚举。

先看各种温度计。温度计的基本功能是测温。但是,测温的需要所产生的不是单一种类的温度计,而是各种各样的温度计。表3.3所示的是各种温度计的种类、原理和测温范围。表中可知,在一定温度范围内,人们可采用不同温度计测温;这些温度计结构各不相同,但读数却相同。

再看各种光学天文望远镜。这些望远镜的基本效能是“望远”。但是根据其原理,可分为折射望远镜、反射望远镜和反射—折射望远

镜,如图 3—20 所示。图中可知,这些望远镜所应用的原理、所采用的结构互不相同,但是在一定观测距离内,它们的功能是相同的。

表 3.3 各种温度计

原 理		利用电的性质		利用热辐射		利用物体膨胀		
种 类		热电 高温计	电阻 高温计	光学 高温计	辐射 高温计	液体 温度计	双金属 温度计	单金属 温度计
测温范围(℃)	最低 最高	- 200 + 1600	- 250 + 1100	+ 700 + 3000	+ 50 + 3000	- 190 + 650	- 70 + 500	- 200 + 600

需要指出的是,这里所说的“一种功能多种结构”并不是一种严格的说法。由于系统的结构不同,将输入转化为输出的内部机制不能相同,所以不同结构之间所相同的只是其效用(如各种温度计都用于测温,各种天文望远镜都用于观测天体)和行为。即是说,不同结构的系统有不同的内在功能,但在一定范围内其效用和行为却可以相同,对相同的输入显示出相同的输出。

另一方面,不同结构的系统即使在质的方面有可能表现出功能上的同质性时,在量的方面却往往很不相同。例如,不同温度计的测温范围差别很大,不同望远镜的观测距离差别也很大。

总之,虽然“一种结构多种功能”的原理和“一种功能多种结构”的原理并不是很严格的说法,但是这些原理确实在大量系统中起作用,而且在一定侧面上可以用数学形式表示,所以在系统研究中有十分重要的理论意义和方法论意义。例如,根据“一种功能多种结构”的原理,我们既可进行结构优化操作,既在追求某一功能时,研究或选择某种最优结构,亦可进行功能模拟操作,即用一种系统结构去模拟另一些系统结构的功能。另一方面,根据“一种结构多种功能”的原理,我们即可进行功能优化操作,力求使一种结构发挥其最优

反射望远镜

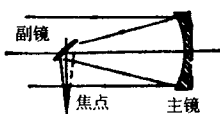


Calilei 式 (1610 年)

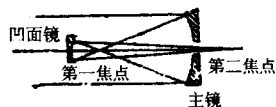


Kcpler 式 (1611 年)

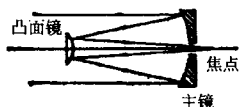
折射望远镜



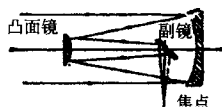
Newton 式 (1668 年)



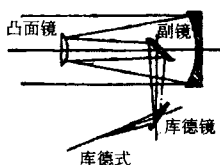
Grgory 式 (1671 年)



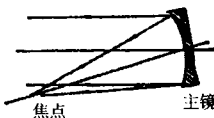
Cassegrain 式 (1671 年)



Nasmis 式 (1851 年)



库德式



Herschel 式

反射-折射望远镜



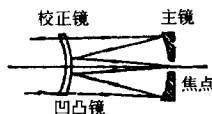
Hamilton 式



Schmidt 式



贝克-斯密特式



Maksutov 式

图 3—20 望远镜的功能与结构

卞尚植(音). 从伽利略望远镜到电子望远镜. 科学东亚(韩国)1990, (8);61

功能,亦可进行结构模拟操作,即在研究某一系统结构时,采用模拟其他系统结构的方法。

3.3 子系统与分系统

在系统概念研究中,除了结构与功能概念之外,又一对重要概念是子系统与分系统。本节的目的是阐明什么是子系统,什么是分系统,怎样理解子系统与分系统之间的关系等问题。

3.3.1 子系统与分系统

在当今的系统研究中,只有很少一些学者区分子系统和分系统。许多人通常把一个系统的下层系统笼统地称为子系统或分系统。或者,许多学者在使用“子系统”或“分系统”概念时,实际上把这两个概念当作同义词来使用。

这种情况显然与英语中没有与之对应的词汇有关。英语单词 subsystem 在中文中通常被译为“子系统”或“分系统”(或“支系统”)。为了区分我在这里称之为“子系统”和“分系统”的两种下层系统,英语中采用其他的用语。例如,米勒在他的《生命系统》一书中用 subsystem 一词表示“分系统”,用 component(组元)一词表示了“子系统”^①。

我认为:子系统是一个系统的下层系统,但是把一个系统的下层系统统称为子系统是不确切的。更细致的研究表明,一个系统的下层系统不是一类,而是可以严格区分的两类,即子系统和分系统。这种理解不仅在理论上具有重要意义,而且在方法论上也有重要意义。

^① 上海理工大学系统工程系的一些教师曾把德文词 Untersystem 译为“子系统”, Teilsystem 译成“分系统”。见:布谢尔(A. Buchel)等. 系统工程(上). 上海机械学院系统工程系, 1983

一、子系统

通常,我们称系统是由两个或两个以上的要素组成的。这些要素又可分成下一等级的要素。这时,为避免语言上的混乱,我们就引进“子系统”概念,说该系统是由两个或两个以上的子系统组成的。原则上,一个系统可分成无穷多个等级。但是在每一个实际问题中,当我们把系统分割成一定数目的等级以后,就达到在所考虑的问题范围内不能或不必再加细分的一些基本单元。我们把这些基本单元称为系统的要素。

由此可知,在由大量要素组成的(复杂)系统中,这些要素与系统之间存在着若干层次的子系统。如果考虑要素与系统之间只有一个层次的子系统的情况,那么就不难看出:一个系统是由若干个子系统组成的,而每个子系统是由若干个要素组成的;子系统的要素数目少于整个系统的要素数目,子系统的规模小于整个系统的规模,如图 3—21 所示。

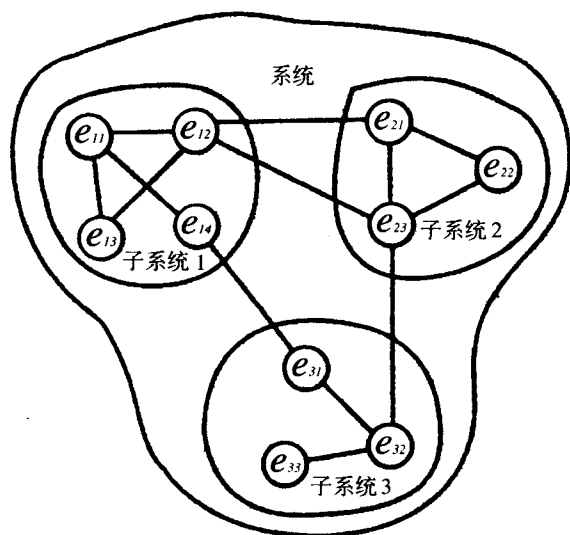


图 3—21 系统、子系统与要素

一般来讲,子系统作为一个系统,它的定义方式和一般系统的定义方式没有什么区别。我们可以像定义系统那样定义子系统。但是,不能把子系统和系统结构混淆起来,不能把子系统理解为系统结构。在引入子系统概念之后,系统结构可以视为系统各子系统的分布关系的总体。另一方面,每个子系统有自己的结构与功能,也就是说,子系统的诸要素之间不仅有自己的分布关系,而且有自己的活动关系。

二、分系统

我们已经知道,结构与功能是从系统内部两种不同类型的关系出发定义的:从系统要素的分布关系出发定义了系统结构,而从系统要素的活动关系出发定义了系统功能。

相仿地,系统的子系统和分系统亦可从系统内部两种不同类型的关系出发定义。一个系统的下层系统可从理论上和经验上明确区分为两类,其中子系统是基于系统构成成分的概念,而分系统是基于系统构成活动的概念。即是说,向下分离系统构成成分而得到的下层系统是子系统,而向下分离系统构成活动而得到的下层系统是分系统。

一般来讲,系统的分系统可定义为在系统内部承担特定活动的相关要素的集合体。从图 3—22 可直观地了解子系统与分系统。图中, US_1, US_2, US_3 表示子系统, TS_1, TS_2, TS_3 表示分系统。这里,这三个分系统是分别与用 $\longrightarrow, \dashrightarrow, \dashrightarrow$ 表示的三种活动有关的。现考虑分系统 TS_1 , 图中三个子系统都包括在该分系统内。一般来讲,只有那些承担活动 $\longrightarrow$ 的要素才被包含于该分系统内。即使说,分系统 TS_1 是承担活动 $\longrightarrow$ 的诸子系统(或诸要素)的集合体。对其他分系统亦可进行同样的说明。

子系统不同于系统结构,而分系统也不同于系统功能。系统功能可理解为各分系统功能的总体,而各分系统的功能可理解为

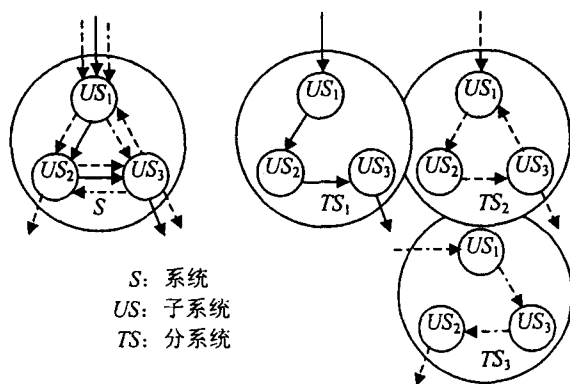


图 3—22 分系统

整个系统功能的特定侧面。当然,如同各子系统具有自己的结构与功能一样,各分系统也具有自己的结构与功能。系统分系统的功能可理解为在系统内部相关要素的特定活动关系的总体,而系统分系统的结构可理解为承担这些活动的诸要素的分布关系的总体。根据以上的讨论,可将各层次子系统和分系统表示为图 3—23。

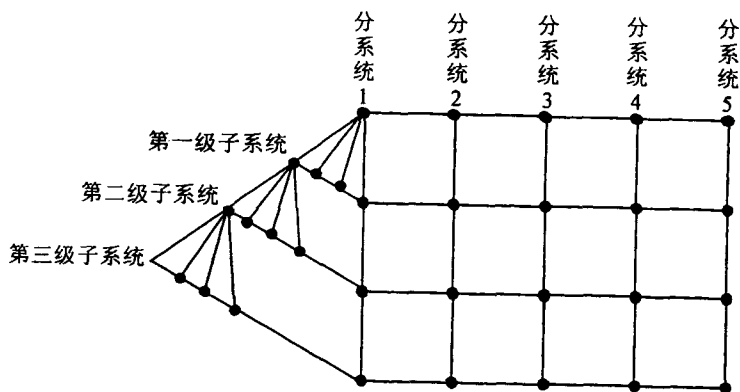


图 3—23 子系统与分系统

从图 3—22 和图 3—23 可知,子系统和分系统分别对应于人们在社会生活中所说的“块块”与“条条”,子系统与分系统的关系相当于“块块”与“条条”的关系。在“条条”与“块块”的关系上,有人主张应当打破“块块”与“条条”之间的现有框框,有人主张应当取消“块块”与“条条”。从一个系统的下层系统可分为子系统和分系统的观点上看,在社会经济系统中“条条”与“块块”的存在并不是人为的。不管人们承认与否,也不管人们喜欢与否,在任何社会经济系统中都存在着“条条”与“块块”。问题不在于社会经济系统之被划分为“条条”与“块块”,而在于如何从社会经济系统的内在特征与人的管理能力出发适当地划分“条条”与“块块”,如何正确地处理“条”与“条”之间的关系、“块”与“块”之间的关系以及“块”与“条”之间的关系。一般来讲,这就要求我们合理地划分一个系统的各子系统和各分系统,正确地处理同一层次内各子系统之间的关系、各分系统之间的关系以及子系统与分系统之间的关系以及不同层次子系统或分系统之间的关系。

3.3.2 若干实例

子系统和分系统概念适用于各种具体系统。这里,我们随意选取一些具体系统,来考察他们的子系统和分系统。通过这些例子,我们能理解子系统与分系统的划分确实是必要的:两者既不能相互混淆,亦不能相互替代。

一、法兰西共和国

在把一个国家作为一个系统考察时,很容易区分其子系统和分系统。这时,子系统相当于国家的各个行政区域,如中国的省、直辖市和自治区,美国的州,日本的县,韩国的道;分系统相当于政府的各个职能部门。各国由于国情不同,在具体的划分上有所不同,但是都以某种方式划分本国的行政区域和职能部门。

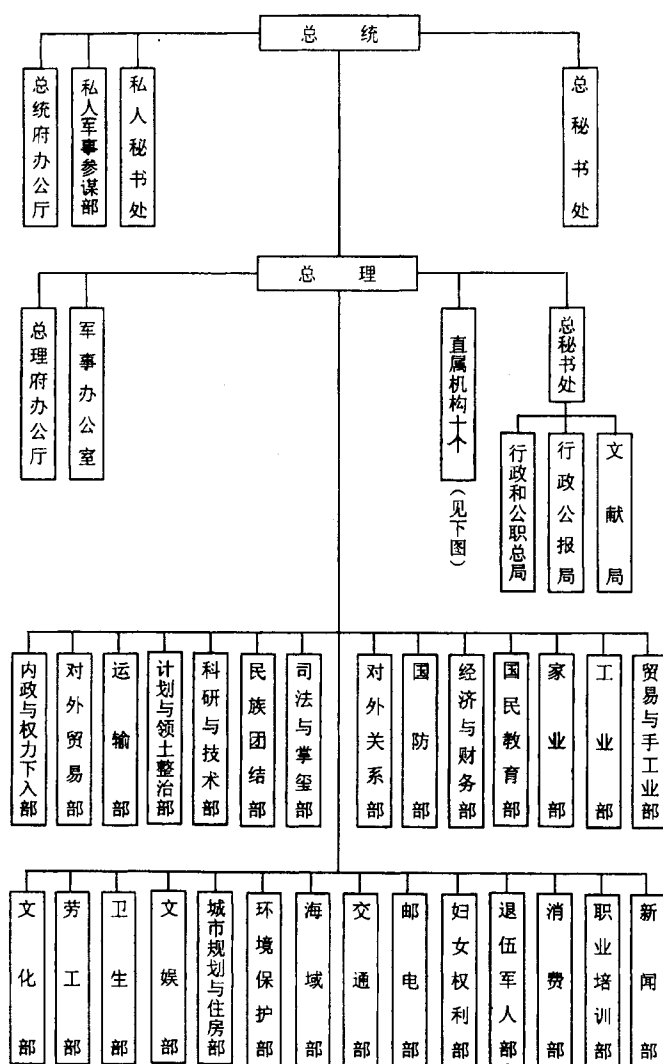


图 3—24 法国中央政府机构图

吴国庆. 法国政府机构与公务员制度. 北京: 人民出版社, 1982. 7—8

这里,我们看典型的法国政府机构的子系统和分系统。各行政区域作为一个国家的子系统,实际上就是领土单位。法国的领土单位就其本土而言,分为两级,即省和市镇。法国本土有 96 个省,海外有 4 个省。据 1972 年统计,全国有 37573 个市镇,是法国最基层的领土单位。各省的土地面积和人口数量(或各市、镇的土地面积和人口数量)差别很大,但是其行政机构和权限都一样。

法国的分系统可从其中央政府机构的设置中了解大致情况,如图 3—24 与 3—25 所示。这些机构的设置在不同时期常有一些变化,但总是以加强分系统功能为目的的。

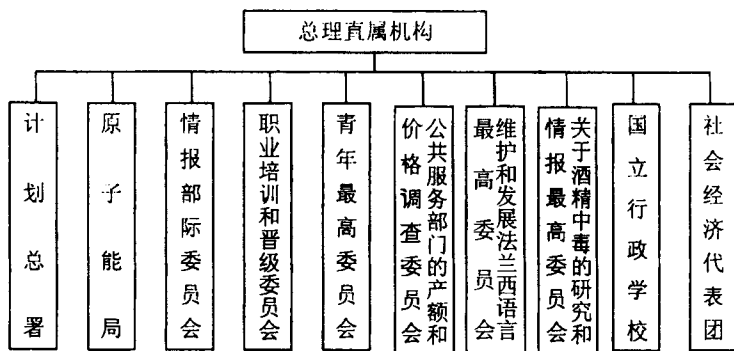


图 3—25 法国总理直属机构图

吴国庆, 法国政府机构与公务员制度, 北京: 人民出版社, 1982. 8

二、工厂

在把一家工厂当作一个系统时, 它的各个车间相当于第一级子系统, 各车间的工段相当于第二级子系统, 各工段中的工人、机器、工具为其要素, 如图 3—26 所示。工厂的分系统则由各个科室来体现, 如图 3—27 所示。

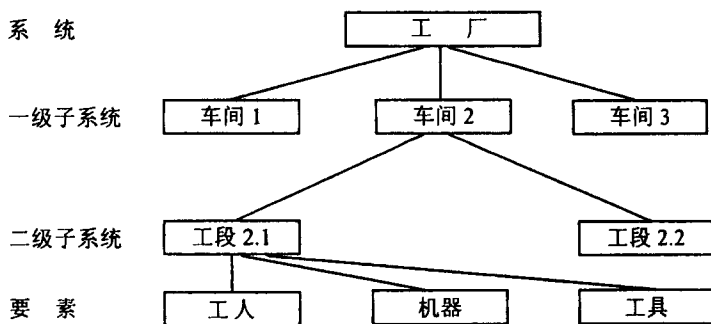


图 3—26 工厂各级子系统

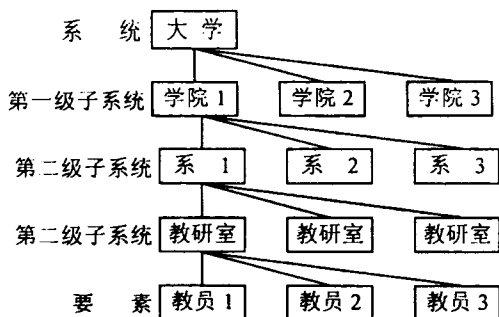


图 3—28 大学各级子系统

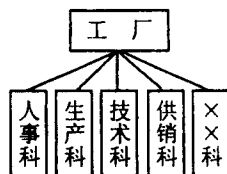


图 3—27 工厂各分系统

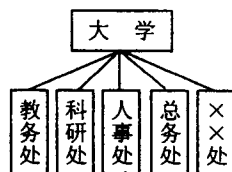


图 3—29 大学各分系统

三、大学

某大学的各级子系统可示为图 3—28。该大学的各分系统,若以机构设置为例,就可示如图 3—29。

四、人体

人体作为一个系统,它的子系统可以用两种方式考察。其一是

划分出人体的“机械性”子系统。这时,人体分成四个部分,即头部(包括颅、面)、颈部、躯干部(包括脊柱、体腔及其内容物)和四肢(包括上肢和下肢)。其二是划分出人体的“功能性”子系统。这时,可把能行使一定功能的结构单位看作是子系统。这样划分出来的子系统等于人体的各器官,如脑、脊髓、心、肺、胃、肠等。

人体的分系统是由共同完成一种或几种生理功能的多个器官组成的。这些分系统内部的器官在空间上可能相互连续,亦可能不连续而分散在体内各部分。人体的分系统可分为八种。

(1) 运动系统由骨关节和骨骼肌组成,具有运动、支持、保护和造血的功能。

(2) 消化系统由口腔、咽、食管、胃、小肠、大肠、肝、胰、肛门等组成,具有消化和吸收食物的功能。

(3) 呼吸系统由鼻腔、喉、气管、支气管、肺等组成,具有交换气体、氧化物质、供给能量的功能。

(4) 循环系统由心脏、血管、淋巴管、淋巴结、扁桃体、脾等组成,具有输送氧气和养料、运送排出的二氧化碳和废物的功能。

(5) 泌尿系统由肾脏、输尿管、膀胱、尿道等组成,具有生成和排出尿液的功能。

(6) 内分泌系统由内分泌腺组成,有垂体、甲状腺、胸腺、肾上腺、胰岛与性腺等,具有促进代谢、调节生长发育的功能。

(7) 神经系统由中枢神经系统的脑和脊髓以及周围神经系统的神经和神经节组成,有调节体内各种活动、调节人体与环境关系的功能。

(8) 生殖系统由生殖腺和一系列附属器官组成。分为男性生殖系统和女性生殖系统。在男性,生殖腺是一对睾丸,附属器官包括附睾、输精管、射精管、前列腺、尿道球腺、阴茎和阴囊;在女性,生殖腺

是一对卵巢,附属器官包括输卵管、子宫、阴道与外阴。生殖系统有产生生殖细胞、繁殖新个体的功能。

从以上几个例子可知,研究任何系统,我们既要研究其各级子系统,也要研究其各分系统。这两方面的研究互相补充,相得益彰。

3.3.3 子系统一分系统矩阵

任何系统的下层系统都分为子系统和分系统,所以研究任何一个系统,可以有两种路径。其一,是先分析系统等级,找出各级子系统,然后再来分析系统的各分系统及其等级;其二,是先分析系统的各分系统及其等级,然后再来研究各级分系统的组元,弄清系统的子系统等级及各子系统。无论采用哪一路径,最后都可以得出统一的子系统一分系统矩阵。该矩阵可示如表 3.4。这里, a 表示与子系统相对应的分系统的组元,亦即与分系统相对应的子系统的组元。因为各级子系统至少有两个,所以 $\{a_{ij}\}$ 表示在第 i 级的各子系统中起作用的第 j 个分系统的各组元。

表 3.4 子系统一分系统矩阵

分系统 子系统	分系统 1	分系统 2		分系统 m
第一级子系统	a_{11}	a_{12}		a_{1m}
第二级子系统	a_{21}	a_{22}		a_{2m}
...	...	...		...
第 n 级子系统	a_{n1}	a_{n2}		a_{nm}
要素	$a_{(n+1)1}$	$a_{(n+1)2}$		$a_{(n+1)m}$

无论任何系统,我们都可以制成子系统一分系统矩阵。据此,不仅可以了解系统的全貌,还可以了解其细节。例如,米勒设计的生命系统的子系统一分系统表,在生命系统研究中有重要意义。他把从阿米巴到联合国、从细胞到超国家系统的所有生命系统分成8个层次,即细胞、器官、生物体、群体、组织、社区、社会以及超国家系统,并把每个生命系统的分系统分为20种,即复制器、边界、摄取器、分配器、变换器、生产器、物能储备器、排放器、驱动器、支持器、输入转换器、内部转换器、信道与信息网、解码器、联系器、存储器、决策器、编码器、计时器、输出转换器,从而构造了生命系统的子系统一分系统表,即表3.5。

此表显得很粗糙,但是从阿米巴到联合国的所有生命系统中找出20种分系统,并在生命系统8个层次上找出承担20种分系统过程的一系列组元,具有重要的理论意义和实践意义^①。

① 想要简单了解米勒先生一般生命系统理论的读者,可参看下列文章。

(1) Miller J G & Miller J L. 生命系统理论. 朴昌根译. 见:邹珊刚等. 系统科学. 上海:上海人民出版社,1987. 427—443

(2) Miller J G. 论生命系统. 朴昌根译. 见:刘洪主编. 新学科精览. 北京:中国科学技术出版社,1990. 102—113

(3) 朴昌根. 生命系统. 见:李继宗等. 系统·信息·控制. 上海:华东师范大学出版社,1990. 168—182

(4) 朴昌根. 生命系统理论. 系统学理论与应用(第一届系统学学术交流会论文集). 上海机械学院学报第13卷增1期,系统学专辑1,1990. (11):76—83

表 3.5 生命系统子系统—分系统表

分系统 子系统	复制器	边 界	摄取器	分配器
细 胞	DNA 分子、 RNA 分子	物 能 与 信 息:外层膜	传递分子	内质网
器 官	向上分散到 生物体中	物 能 与 信 息:被 膜 或 外层	输入动脉	细胞间液
生物体	睾丸、卵巢、 子宫、外阴	物 能 与 信 息:皮肤或其 他外表覆盖物	口部、鼻、皮肤 (在若干物种中)	高等动物的脉 管系统
群 体	建立新家庭 的父母	物能:检查 士兵信息:家 庭中收看电视 规则	社交俱乐部中 茶点室主任	照顾伙食的 母亲
组 织	发执照的 团体	物能:工厂 门卫人员 信息:图书 馆员	接待部门	装配线
社 区	向准州授予 州权限的国家 立法机构	物能:农业 检查官员 信息:电影 审查员	城市机场当局	城镇学校校车 驾驶员
社 会	制定国家宪 法的立宪会议	物能:关税 部门 信息:保安 机构	移民事务机构	国家铁路工作 人员
超国家 系 统	联合国,当 它建立新的超 国家机构时	物能:柏林 墙部队 信息:北大 西洋公约组织 治安防卫当局	接纳成员国的 立法机构	跨国电网操作 人员

(续表)

分系统 子系统	变 换 器	生 产 器	物能储备器	排 放 器
细 胞	线粒体内的酶	绿色植物中的叶绿素	腺苷三磷酸	伸缩泡
器 官	胃膜细胞	胰岛	腺腔	输出静脉
生物体	上胃肠道	为代谢及修复进行物质合成的器官	脂肪组织	动物皮肤上的汗腺
群 体	裁衣小组成员	家庭炊事人员	处理杂物的家庭成员	丢弃垃圾的母亲
组 织	炼油厂操作人员	工厂生产单位	储藏室管理人员	房屋管理人员
社 区	城市堆料场组织	面包房	社区监狱官员	城市卫生部门
社 会	核工业	全国农民及工人	国家军械库护卫人员	国家出口组织
超国家系统	欧洲原子能联营, 欧洲原子核研究委员会, 国际原子能机构	世界卫生组织	跨国水坝及水库	向下分散到社会中

(续表)

分系统 子系统	驱 动 器	支 持 器	输入转换器	内部转换器
细 胞	纤毛,鞭毛, 伪足	细胞骨架	细胞膜上为环 腺苷酸活化起作 用的感受器部位	阻遏物分子
器 官	平 滑 肌, 心肌	基质	感觉器官的感 受器细胞	心脏窦房结的 特化细胞
生物体	高等动物的 骨骼肌	骨骼	感觉器官	本体感受器
群 体	家庭车辆驾 驶员	筑巢的鸟	盗窃集团的瞭 望员	向群体决策者 汇报其他成员态 度的群体成员
组 织	公司飞机驾 驶员	房屋维修 人员	负责接收电话 的秘书	工厂质量管理 单位
社 区	城 市 运 输 机构	市政大楼管 理人员	从各州首府向 地方选民作报告 的众议员	街邻防卫小组
社 会	货车运输业	管理国家公 共房屋及土地 的官员	国际新闻服务 部门	民意测验组织 投票人
超国家 系 统	联合国车队 驾驶员	维护国际组 织 总 部 大 楼 人员	为听取非会员 国代表发言而召 集的联合国大会	参加超国家会 议的会员国发 言人

(续表)

分系统 子系统	信道与信息网	计 时 器	解 码 器	联 系 器
细 胞	信使核糖核 酸通道,第二 信使	起伏腺苷三 磷酸与烟酰胺 腺嘌呤二核苷 酸磷酸	分子组合部位	未知
器 官	器官的神经 网络	心脏起搏器	感觉器官第二 阶梯细胞	未发现;向上 分散到生物体中
生物体	激素路径, 中枢及周围神 经网	下丘脑的超 交叉核	感觉核	未知神经组元
群 体	群体成员间 面对面的交流 通道	及时唤醒家 庭其他成员的 母亲	向小组解释规 则的成员	教导优良行为 的父母
组 织	使用公司电 话的所有人员	工厂时笛的 操作人员	外文翻译小组	培训新雇员的 人员
社 区	城市电话接 线员	市政厅钟楼 大钟看管人	解释法律的州 司法部长	城市学校教师
社 会	电话及通讯 组织	决定时间及 区域变更的立 法机构人员	密码员	全国教育机构
超国家 系 统	万 国 邮 政 联盟	格林威治天 文台人员	超国家组织同 声传译人员	联合国粮农组 织中在第三世界 国家传授耕种方 法的单位

(续表)

分系统 子系统	存 储 器	决 策 器	编 码 器	输出转换器
细 胞	未知	调节基因	激素合成部位	神经元前突触膜
器 官	未发现;向上分散到生物体中	心脏窦房结的交感纤维	输出神经元前突触区	输出神经元前突触区
生物体	未知神经组元	神经系统若干阶梯上的组元	人脑优势半球皮层的颞顶区	喉部
群 体	保管家庭档案的父亲	父母,家庭会议	群体通讯资料的撰稿人员	陪审团发言人
组 织	档案管理部门	总经理,部门经理,中层经理	年度报告的撰稿人员	公共关系部门
社 区	中央警察计算机操作人员	州长,州议员,州法官	城市法规的起草人员	由各州选至国家立法机关的代表
社 会	国家档案馆管理人员	国家政府的官员及选民	条约起草人员	出席国际会议的国家代表
超国家系统	联合国图书馆馆员	欧洲共同体部长会议	联合国新闻署	宣布超国家机构决定的高级官员

Miller J G. & Miller J L. Introduction: the nature of living systems, *Behavioral Science*, 1990(3):157—163

第四章 系统分类

“系统”或“一般系统”作为系统学的基本概念,是从各种现实系统中抽去其特殊内容而得到的抽象物。但是在现实中作为具体对象存在的不是—般系统,而是各种具体系统,不管它们是天然的还是人造的,物质的还是概念的,生命的还是非生命的。—般系统体现各种具体系统的共性,而具体系统则是一—般系统的各种存在形式。具体系统除了具有一—般系统属性外,还具有各种特殊属性。

系统学力求揭示—般系统的一—般规律。但是我们决不能脱离具体系统去研究—般系统,应该通过对具体系统的研究揭示—般系统的普遍规律。当然,系统学在充分发展的形式上应该有自己的逻辑体系,而在这个逻辑体系中,系统规律应该是可以从系统概念出发推演出来的。但是,无论是从各种具体系统中概括出来的系统规律,还是在逻辑上从系统概念出发推演出来的系统规律,都应该在现实的各种具体系统中得到验证。

不仅如此。系统学所要揭示的也并非必须是适用于一切系统的系统规律,它还要揭示适用于各种不同类型系统的系统规律。而为了研究各类系统的系统规律,就需要根据各种具体系统的共同点和差异点对各种具体系统进行分类。不管我们所研究的是现实系统还是系统模型,系统分类是必不可少的。

这样,系统分类学就应运而生。它的任务在于为系统分类提供理论依据,为系统分类建立科学标准,并根据这些标准对各种具体系

统分门别类。

4.1 系统分类原则

系统分类总是根据某种分类标准进行的。如果采用不同的分类标准,即使是同样一个系统,也会属于完全不同的类。例如,一个人可以被看作是一个动物,一个教师,一个穷人,一个有志气的人,或一个善于阿谀奉承的人。系统分类的根据是系统分类的一般原则。这里,我把系统分类的一般原则概括为单一性原则、加和性原则和客观性原则。

4.1.1 单一性原则

在对作为我们研究对象的各种具体系统进行分类时,在每个个别场合中,所选取的分类标准必须是单一的。不能在一次分类操作中使用两种或多种分类标准。也就是说,系统分类必须遵循“一个标准一次分类”的原则。这就是所谓“单一性原则”。

如果违背系统分类的单一性原则,分类结果就会出现混乱。例如,我们可根据笔的结构特性把各种笔分为毛笔、铅笔、钢笔、圆珠笔等。但是,如果把一堆笔分成毛笔、红笔、公用笔等,就是错误的分类。这种分类违背了单一性原则。违背单一性原则的分类不仅其结果是混乱的,而且在其操作过程中必将出现不可操作现象。如在上例中,公用笔既可能是红笔,亦可能是毛笔。

如果在分类过程中严格遵循单一性原则,其分类结果就必然有排他性。因此,在系统分类中,排他性原则可作为单一性原则的一个推论。所谓排他性原则,是指分类结果必须有排他性,即一类系统的各子类必须是排他的,不应当是互相包容的。例如,把一群知识分子分成富裕的、水平高的、有社交能力的,就不是互相排他的,而是互相

包容的。分类结果上出现的这种非排他现象,就是由于违背单一性原则。

4.1.2 加和性原则

当把一类系统分成 n 个子类时,各子类的总和必须等于该类,即从外延上看,

$$\text{类} = \text{子类 } 1 + \text{子类 } 2 + \cdots + \text{子类 } n。$$

这就是所谓加和性原则。这意味着在系统分类中,一方面不能把不属于所讨论类的系统作为其子类,另一方面不能把属于所讨论类的某些子类遗漏。例如,把生物分为动物和植物,是一种有遗漏的分类,因为没有把微生物考虑进去;但是,把生物分为动物、植物、微生物和生物大分子,也是错误的,因为生物大分子并不是生物体。

如果在系统分类中违背单一性原则,分类结果中就会出现不符合加和性原则的现象,即是说某些异类系统被作为子类包括进来。当然,也不能简单地认为在遵循单一性原则的情况下,分类结果一定能满足加和性,因为有可能出现遗漏某些子类的现象。在实际的分类过程中,常常有遗漏现象,所找出的子类之和未能穷尽整个类的外延。这通常是由于人的认识水平、科学水平的局限性。例如在发现微生物之前,人们只能把生物分为动物和植物。这一分类遵从了单一性原则,因此还是一种有价值的分类,虽然它还没有完全满足加和性原则的要求。

4.1.3 客观性原则

系统分类通常是根据研究目的、按照研究者所制订的分类标准进行的。尤其在根据系统模型对系统进行分类时情况更是如此。这是系统分类的主观性的一面。

但是,研究目的的设定、分类标准的制订和选取决不是随意的。首先,只有在研究目的有可能揭示研究对象的本质联系时,研究工作才有可能取得成功。其次,系统分类标准必须建立在具体系统自身特征的基础上,建立在具体系统自身的“自然属性”基础上。这就是系统分类的客观性的一面。实际上,每一种正确的分类标准都从某个侧面上反映具体系统的某种客观特征。这就是客观性原则的根据所在。

例如,根据对人类有利还是有害,可以把昆虫分为益虫和害虫。前者有吐丝的蚕,酿蜜和传播花粉的蜜蜂,捕食农业害虫的螳螂、瓢虫、蜻蜓等;后者有传染疾病的苍蝇、蚊子等,危害农作物的蝗虫、螟虫、棉蚜虫等。这种分类显然是以这些昆虫在客观上对人类所起的作用为根据的。

虽然从强调系统分类必须尊重具体系统本身的客观特征的角度上,这里使用了“客观性原则”一词,但是考虑到系统分类总是具有主观性侧面,所谓“客观性原则”亦可称为“客观与主观相结合的原则”。

当我们根据以上的三条原则对具体系统进行分类时,通常采用这样两种分类方法:其一是根据现实系统的实际内容进行分类,其二是根据系统模型的特征进行分类。

4.2 现实系统的分类

面对茫茫无垠、纷繁复杂、千差万别的各种现实系统,我们可利用各门学科已取得的科学知识,根据具体系统的具体内容,将现实系统划分为各种类或子类。但是,具体系统通常具有多方面的特征,而在每一具体分类操作中,只能根据其中的一种(或少数几种)特征进行分类。选择哪一种特征,这当然属于人的自由。人们可根据自己的目的、爱好、认识水平和需要等,提出各种不同的分类标准,并按照

这些分类标准对现实系统进行分类。下面,我们介绍其中的一部分。

4.2.1 天然系统与人造系统

具体系统,根据其是不是人造的,可分为天然系统和人造系统。

所谓人造系统,是指靠人的劳动和其他活动制成的各种系统。例如,人们加工自然物制成的各种系统,诸如工具、仪器、机器、设备等;由一定的组织、制度、程序等构成的各种管理系统和社会系统;人类认识活动的产物,诸如各种哲学体系、科学体系、技术体系等,都属于人造系统。

从其要素的特征出发,人造系统又可分为三种:第一,是其构成要素皆为天然物的;第二,是其构成要素皆为人造物的;第三,是其构成要素中既有天然物又有人造物的。例如,人们用直接从自然界捡来的石块砌成的简易房屋属于第一种;由各种人造零件装配成的一台机器属于第二种;由自然的风力和人造的发电设备组成的风力发电系统属于第三种。

所谓天然系统,是指与人类的劳动和其他活动无关地产生和存在着的各种系统。例如,银河系、太阳系、地球、矿物、河海等都是天然系统。

在地球表面上,人的作用日益增多,纯粹由天然物构成的人造系统日益减少,由人造物构成的人造系统日益增多;与此同时,纯粹的天然系统也日益减少。人类的活动已在地球表面上打下了各种各样的印迹,而这些印迹不仅在广度上而且在深度上越发明显。这样,整个地球表面以及其中的大量系统已经不是纯粹的天然系统,而是人造系统和天然系统的复合系统,或者说,地球表面上的大量天然系统经过人类的改造,已经和正在转化为人造天然系统。另一方面,人类社会本身也不是纯粹的人造系统。虽然单个人或各种人类集团对人类社会的历史进程施加各种作用,采用各种手段使人类社会更适合

于人类的生存和生活,但是我们不能忘记:人类不过是地球表面上作为天然系统的生物长期进化的最终产物,而人类社会有不依人的意志为转移的自然规律。所以,在合理的理解上,人类社会应被看作是天然系统和人造系统的复合系统,而人造系统乃是整个天然系统的一个特殊的子类。人类只有认识到自己也是整个天然系统的一个渺小的子类,才能在真正伟大的大自然面前使自己的傲慢有所收敛。

4.2.2 自然系统、社会系统和思维系统

在科学的传统上,人们把对象世界分为自然系统、社会系统和思维系统,也就是作为一个系统的自然界、作为一个系统的人类社会和作为一个系统的人类思维活动。

自然系统,是指整个自然界和其中的各种系统。通常又分为生物系统和物理系统。前者为生物科学的研究对象,后者则是物理科学(包括物理学、化学、天文学、地学)的研究对象,而生物科学和物理科学统称为自然科学。

社会系统即人类社会,是指由相互发生社会联系的众多个人组成的总体。社会系统既可以指整个人类社会,也可以指社会系统中的各子系统和分系统。社会系统可分为政治、经济、军事、文化、教育、行政等分系统,这些分系统则是社会科学各分支学科的研究对象。

思维系统,是指由人的神经、心理、语言、文字、逻辑、思维方法以及其他思维工具组成的系统。思维系统的结构与功能以及发展规律乃是思维科学的研究对象。

4.2.3 物质系统和概念系统

具体系统,根据其要素是物质还是概念,可分为物质系统与概念系统。

所谓物质系统,是指以各种物质(和能量)为要素而构成的系统。例如,原子、分子、矿山、海洋、气象、机器、生物、太阳系等都属于物质系统。上面所讨论过的“天然系统”、“自然系统”显然是物质系统。

所谓概念系统,是指以各种概念、原理、原则、规律、方法、制度、程序等为组元而构成的系统。例如,科学体系、法律体系、宗教体系、道德规范、哲学体系等都属于概念系统。

社会系统既有物质系统的特性,又有概念系统的一面。在社会系统中,人类的生存和生活所需的住房、衣类、食物、能源、交通工具等生活资料和厂房、机器、农田、农机等生产资料是物质性的,而道德、法律、哲学、宗教、科学等领域则是概念性的。因此,社会系统既可视作天然系统和人造系统的复合系统,又可视作物质系统和概念系统的复合系统。这里的关键在于人不仅仅是物质性的存在物,而且是一种能认识和改造对象世界并具有自我意识能力的存在物。

4.2.4 生命系统和非生命系统

物质系统,根据其有没有生命,可分为生命系统和非生命系统。

所谓生命系统,是指各种有生命的物质系统,其中包括生物系统和人类社会系统。不仅各单个生命体(如一个动物,一棵植物,或一个微生物)可视为生命系统,而且由两个或两个以上的生命体所构成的系统以及以这些生命体为主体而构成的系统亦可视为生命系统,如生物群体、人类群体、人类组织、社区、社会等。生命系统是所谓生命系统理论的研究对象。

所谓非生命系统,是指除生命系统以外的一切物质系统,如原子、分子、机器、天体等。物理科学的研究对象通常是非生命系统,但是物理科学把揭示生命系统的物理—化学机制也作为自己的重要任务之一。

生态系统是由生物群落及其地理环境构成的自然系统。在生态系统中既有有生命组元,又有无生命组元。在这一点上,生态系统类似于社会系统,因为社会系统也包含着有生命组元和无生命组元。但是,一般来讲,生态系统不能看作是生命系统,而社会系统却可看作是生命系统。两者的本质区别在于:在社会系统中,生命体(人类)是整个系统的主体,而在生态系统中,生命体不能简单地被视为整个系统的主体。因此,生态系统既不是生命系统,也不是非生命系统,而是生命系统和非生命系统的复合系统。

4.2.5 渺观、微观、宏观、宇观与胀观系统

物质系统,根据其空间尺度的大小,可分为五种:渺观系统,如超弦;微观系统,如中子、质子等基本粒子;宏观系统,如地球表面上的各种物体;宇观系统,如银河星系;胀观系统,如超星系团。这时,所选用的尺度为

$$1ls = \sqrt{\frac{h}{2\pi} \frac{G}{c^3}} \approx 10^{-34} (\text{cm}) \quad (4.1)$$

式中,

$$\text{普朗克常数 } h = 6.626176 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$$

$$\text{万有引力常数 } G = 6.6720 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$\text{光速 } c = 2.99792458 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

当把渺观系统(超弦)典型长度设为 $1ls$ 时,其他系统典型长度为

渺观系统	$10^{19 \times 0} ls$
微观系统	$10^{19 \times 1} ls$
宏观系统	$10^{19 \times 2} ls$
宇观系统	$10^{19 \times 3} ls$
胀观系统	$10^{19 \times 4} ls$

可将这五种系统的有关情况表示为表 4.1。

表 4.1 按空间尺度划分的物质系统等级

层次	典型尺度	过渡尺寸	例	理 论
?				
?				
胀观	10^{40} 米 = 10^{24} 光年 = 10^{16} 亿光年	3×10^6 亿光年 3 亿千米	银河星系 太阳系 篮球场 大分子 基本粒子	广义相对论
宇观	10^{21} 米 = 10^5 光年			牛顿力学
宏观	10^2 米			
微观	10^{-17} 米 = 10^{-15} 厘米	3×10^{-6} 厘米		量子力学
渺观	10^{-36} 米 = 10^{-34} 厘米	3×10^{-25} 厘米		超弦?
?				
?				

钱学森. 基础科学研究应该接受马克思主义哲学的指导. 见: 刘洪编. 新学科精览. 北京: 中国科技出版社, 1990. 5

这里, 十分有趣的是从渺观到胀观的各系统之间分别相差 19 个数量级。而至今为止研究较多的是宏观系统、微观系统和宇观系统, 对渺观系统和胀观系统知之甚少。

4.2.6 小系统、中系统与大系统

系统按其规模大小可分为大系统、中系统和小系统。但是这一分类至今还没有严格的分类标准, 并且只有“大系统”概念常被使用, “中系统”或“小系统”概念很少使用。这里主要讨论什么是大系统。

首先,这里所说的“规模”,并非指直观上的规模,不是在太阳系或埃及金字塔的规模很大这种意义上使用的。人脑虽然绝对尺寸不大,但通常被视为大系统。规模的大小不仅与系统自身的性质有关,而且与人的认识有关。例如,对于研究电子元件的技术人员,电子计算机是个大系统,但是对于大型计算机网络设计人员,一台计算机只是网络中的一个部件。

就系统的规模与复杂性的关系而言(参看本书 4.3.8),复杂系统未必是规模大的,而大系统也未必是复杂的。当然,在很多情况下,系统的规模与复杂性有密切关系,规模大的系统往往是复杂系统。这是因为一个系统可能的最大复杂度等于其要素数 n :

$$C_{\max} = n(n-1)/(n-1) = n \quad (4.2)$$

此处假定每两个要素之间只有一种关系。即是说,系统的要素越多,它就有可能是越复杂的系统。但是,在这里所谓规模与复杂性又与人的认识能力、技术手段和研究方法等因素有关。如图 4—1 所示,1949—1969 年间的可求解数学规划问题的规模与复杂性之间的关系表明,当研究能力为一定时,可研究的系统规模与复杂性之间存在着近似的“反比”关系。

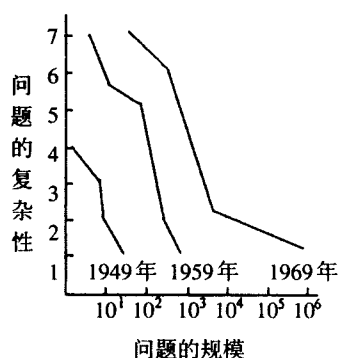


图 4—1 规模与复杂性
以可求解的数学规划问题为例

从上可知,我们无法确切地区别现实系统中哪些是大系统,哪些是中系统或小系统,但是从图 4—2 可知,经常被当作“大系统”的系统是哪些系统。

此外,“大系统”概念还经常被用于表示系统模型。需要指出的是,大系统的模型未必是“大”的。例如,我们的“世界”应当可算为一个大系统。但是,罗马俱乐部的“世界模型”中,要素只有五种,即人

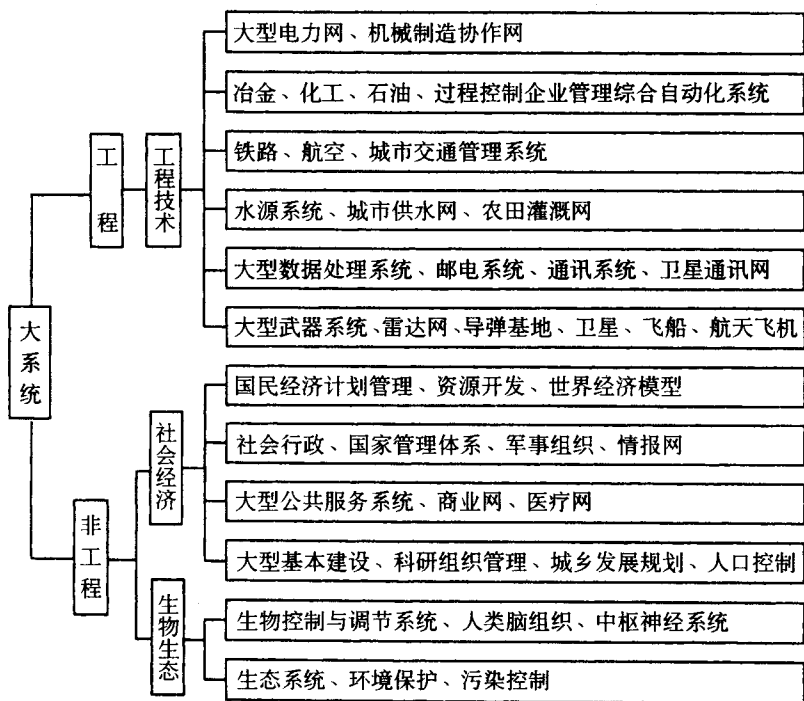


图 4—2 大系统的分类及实例

中国科协普及部编. 系统工程普及讲座汇编(上). 1980. 102

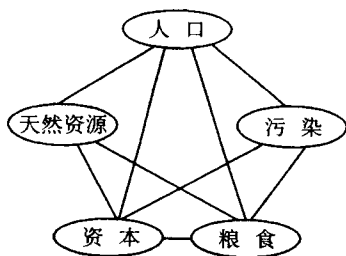


图 4—3 “增长的极限”
中的世界模型

口、污染、粮食、天然资源以及资本，见图 4—3。

总之，现在人们所说的大系统，实际上是指大规模复杂系统，它具有如下几个特点：一是规模庞大，即系统的要素众多；二是结构复杂，即要素的分布关系十分复杂，通常是多层次的；三是功能复杂，即要素活动关

系十分复杂,效能多种多样;四是目标多样,即不是单目标系统,而是多目标系统。

4.2.7 硬系统与软系统

具体系统,根据其实体是不是可视的,可分为硬系统和软系统。

所谓硬系统,是指其实体是可视的系统,如机器、工厂、农场、建筑物等各种物质系统是硬系统。各种硬系统是所谓硬科学的研究对象。

所谓软系统,是指其实体是不可视的系统,如制度、方式、方法、法则、程序等各种概念系统是软系统。各种软系统是所谓软科学的研究对象。

表 4.2 硬系统与软系统

硬 系 统	软 系 统
机器、工具	使用方法
电子计算机	程序
电车	运行时刻表
工厂	制度、经营方法
教育机关	教育制度
电话交换台	电话交换方式
城市设施	城市管理方法
国家	宪法

浅居喜代治. 現代システム工学の基礎. 東京: オーム社, 1979. 3

硬系统与软系统之间存在着某种对应关系。硬系统的组元是各种硬件,而这些硬件之所以能结合成一个系统,是因为有了相应的软件。每个硬系统都有与之相对应的一组软系统。同时,每个软系统也都有与之相对应的一组硬系统。

就人造硬系统而言,为了有效地发挥其功能,又需要与其运行有

关的软系统,如表 4.2 所示。但是,人们在以往的活动中,往往只承认硬系统的经济价值,忽略了软系统的重要性。结果,硬科学受到重视,软科学被忽视;硬系统有了很大发展,而软系统处在落后的状态。可喜的是,最近,人们开始越来越重视软系统。

4.2.8 作业系统与管理系統

一般来讲,人类的各種活动可分为两类,其一是对于各种对象物直接起作用,使之发生某种变化的活动,诸如办厂种田,销售消费,著书立说,授课阅卷等。这类活动可称为“作业”。其二是对各种作业过程的“管理”活动。这样,以各种作业活动为基本要素构成的系统称为作业系统,以各种管理活动为基本要素构成的系统称为管理系统。

实际的作业系统是由物质因素、作业人员、作业程序与方法为组元的系统。作业系统是工业工程学的研究对象。

管理系统过去是以管理人员、管理程序与方法为组元的。现在,由于电子计算机和数据传输系统等信息处理机在管理工作中大量使用,现代管理系统是以管理人员、信息处理机、管理程序与方法为组元的系统。管理系统是管理工程学的研究对象。

就规模小、过程简单的作业系统而言,管理工作常被认为是无足轻重的,甚至被认为是可有可无的。但是,随着作业系统变得规模庞大,结构复杂,现代社会对管理系统的要求越来越高。就现代社会而言,如无合理的管理系统,大量作业系统就无法正常运行。作业系统与管理系统的协调发展,是解决各种社会问题、提高人的工作效率的基本措施之一。在中国改革开放之前,不大重视管理工作,经常试图依靠“群众运动”(例如,1958 年的“大跃进运动”和 20 世纪 60 年代以后的“农业学大寨运动”等)提高社会生产力,主要有两方面的原因:其一是当时许多生产部门,尤其是基本建设和农业生产领域作业

系统尚不发达,不大需要细致的管理工作;而更重要的是当时的领导层普遍忽视管理工作的重要性,认为只要调动群众的劳动积极性,就能提高劳动生产率。相比之下,改革开放以后中国社会生产力高速发展的原因之一,应该说是由于对管理工作的普遍重视。

4.3 系统模型的分类

面对现实中的各种具体系统,我们通常从不同的侧面、不同的角度、不同的目的出发,用不同的手段和不同的方法进行研究。其中,最常用的手段之一是使用系统模型。在系统分类研究中,除了上面所介绍的根据具体系统的实际内容进行分类的研究途径外,根据系统模型进行分类也是一种基本的研究途径。

所谓系统模型,是对现实系统的抽象、模仿或简化表示。系统模型通常由现实系统中与研究目的有关的部分或因素所构成,并反映这些部分或因素之间的关系。因此,在一定近似上,可用系统模型代表现实系统,从而可根据系统模型的特性讨论现实系统的分类问题。

但是,模型的分类与系统的分类并不总是相一致的。在表 4.3 中给出模型分类的多种例子。从中可知,模型分类的某些结果可直接作为它们所代表的现实系统的分类,但模型分类的另一些结果却不能用来表示现实系统的分类。

在系统研究中,最受重视的是结构模型和数学模型。结构模型是对现实系统结构的模仿或简化表示,如物理学上的原子结构模型、遗传学上的 DNA 双螺旋结构模型、社会学上的社会结构模型和工程学上的各种实物模型。数学模型通常由组元、变量、参量、函数关系这四项构成。组元是数学模型的要素。变量分为外生变量、内生变量和状态变量。外生变量,亦称输入变量,能形成系统的输入,是可控的变量。内生变量,亦称输出变量,可在输入变量作用

下发生变化,是不能直接控制的变量。状态变量是表示系统内部各时间状态的变量,也就是表示组元状态的变量。参量是在给定条件下取固定值的变量。函数关系是指组元、变量、参数之间的相互关系。

表 4.3 模型的分类

分类观点		基本分类	再现性和精度	基于结构的分类
系 统	$f \rightarrow$	实际模型 思考模型	完全模型 不完全模型 近似模型	数学模型 逻辑模型 图形模型 模拟模型 启发式模型
分类的观点		变量变化	按分析对象分类	一般分类
系 统	$f \rightarrow$	确定型模型 概率型模型	过程模型 状态变量模型 性能模型 可靠性模型 时间模型 费用模型 人的行为模型 组织模型 生态模型 等等	数学模型 描述模型 图形模型 电子计算机模型 物理模型 硬件模型 软件模型

秋山穰、西川智登. 系统工程. 北京:机械工业出版社,1983. 31

4.3.1 封闭系统与开放系统

一个系统如果与环境有输入、输出或输入—输出关系,就称为开

放系统；一个系统如果与环境没有输入—输出关系，就称为封闭系统。或者说，凡具有动态边缘要素的系统，就称为开放系统；凡不具有动态边缘要素，边界只由隔离要素构成的系统，就称为封闭系统。例如，在图 3—1 中，要素 e_1 和 e_3 是动态边缘要素，因此该图所示的是开放系统。但是，图 4—4 所示的系统不具有动态边缘要素，因而是一个封闭系统。

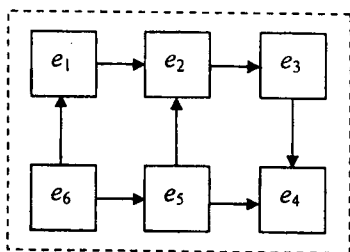


图 4—4 封闭系统

设系统 S 与环境 $\bar{S}$ 之间的关系为 R 。如有 $SR\bar{S}$ ，或 $\bar{S}RS$ ，或 $SR\bar{S}$ 且 $\bar{S}RS$ ，则系统 S 是开放系统；如有 $SR\bar{S}$ ， $\bar{S}RS$ ，则系统 S 是封闭系统。

也就是说，在系统学中，我们把那种与环境毫无关系的系统称为封闭系统，否则就称为开放系统。用数学语言来讲，封闭系统既无外生变量，亦无内生变量。

对于现实系统而言，任何具体系统都不可能与环境毫无关系，因此任何具体系统都不可能是完全封闭的。封闭系统与开放系统的区分只是在系统模型中名符其实。现实的系统都是开放系统。当我们把某个现实系统说成是封闭系统时，这是一种近似说法，或者是根据某种研究需要而进行的人为简化操作的结果。实际上，对于任何现实系统，我们所要讨论的是，该系统对于哪些量是开放的，而对于哪些量是封闭的；或者，在哪些方面是开放的，而在哪些方面是封闭的。

这里，还需要注意的是，物理学和系统学在用语上的区别。如图 4—5 所示，物理学上通常把系统分为三种：(1)开放系统，指与外界交换物质和能量的系统；(2)封闭(或闭合)系统，指与外界只交换能量而不交换物质的系统；(3)孤立系统，指与外界既无能量交换又无物质交换的系统。

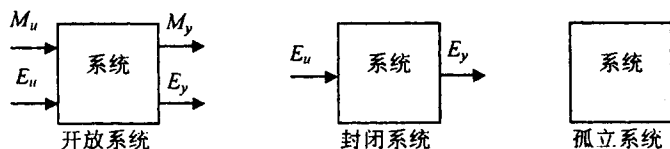


图 4—5 物理学上的三种系统

4.3.2 开环系统与闭环系统

在开放系统中,系统的输出是否对系统的输入产生作用,可分为开环系统和闭环系统。

开环系统,是指系统的输出取决于系统的输入和状态,而对系统的输入不起作用的系统,如图 4—6 所示。简单的程序控制系统不含有反馈回路,系统中信号的传播只有从输入端到输出端的一种方向,因而是一种开环系统。

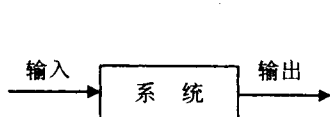


图 4—6 开环系统

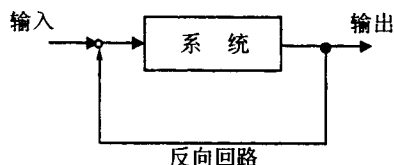


图 4—7 闭环系统

闭环系统,是指系统输出的一部分流向输入端的系统,如图 4—7 所示。闭环系统中人们最关心的是闭环控制系统,而闭环控制系统可分为前馈控制系统和反馈控制系统。所谓前馈控制,是指根据控制对象的环境条件事先计算控制量并馈入输入端的控制方式,也就是在环境条件还没有影响到控制对象之前进行预测而施加控制的一种方式。例如,自适应控制和学习控制属于前馈控制。

反馈控制是指将系统输出的一部分送回输入端,以增强或减弱

系统输入的效应。减弱输入效应的,称为负反馈;增强输入效应的,称为正反馈。正反馈又可分为三种。其一是发散型正反馈,它能单调地加强系统的行为,如图4—8的(a)。通货膨胀、无休止的争吵、战争的逐步升级等属于这种情形。其二是稳定型正反馈,它能使系统恒定地重复其行为,如图4—8的(b)。在工业界不同企业之间的反复相互依赖的合作等属于这种情形。其三是收敛型正反馈,它能使系统行为单

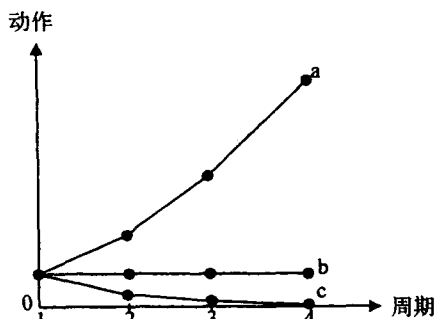


图4—8 正反馈:

(a) 发散; (b) 稳定; (c) 收敛

盖叶尔 R F, 佐文 J V D(编).

社会控制论. 北京: 华夏出版社, 1989

调地衰减,如图4—8的(c)。

敌对行动、通信联系、恋爱及友谊关系的逐渐中止过程等属于这种情形。负反馈亦可分为三种。其一是发散型负反馈,它能使系统振荡地加强行为,如图4—9的(a)。例如,在管理系统中,一个约束往往伴随一个较大的让步,而让步之后又伴随一个更大的约束。由于这种恶性循环,系统管理行为就从一个极端走向另一个极端,最终会导致灾难性的结局。其

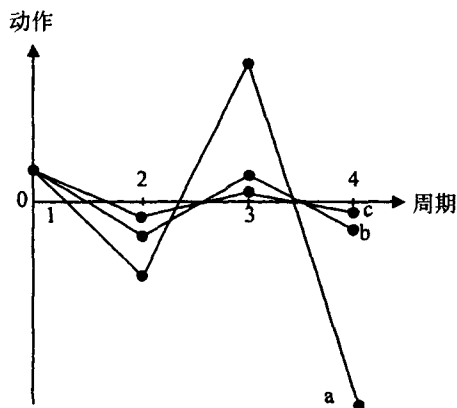


图4—9 负反馈:

(a) 发散; (b) 稳定; (c) 收敛

(同上)

二是稳定型负反馈,它能使系统振荡地重复其行为,如图4—9的(b)。这是一种典型的调节过程。例如,生产的增加将导致物价的降低,而物价的降低将引起生产下降,而生产的下降又将引起物价上涨,物价上涨又刺激生产增加,如此反复循环。其三是收敛型负反馈,它能使系统行为振荡地衰减,如图4—9的(c)。例如,在一个人口出生率相对稳定的国家,因战争而出现的人口减少会刺激出生率增加,从而导致人口过剩,以致又要减少出生率,直至恢复原来的出生率。

4.3.3 静态系统与动态系统

根据系统状态(或行为)与时间的关系,可将系统分为静态系统和动态系统。

静态系统,亦称无记忆系统。如果一个系统在任一时刻的输出只与该时刻的输入有关,而与该时刻之前或之后的输入无关,则称之为静态系统。例如,由固定电阻 R 、电压 $V(t)$ 、电流 $I(t)$ 组成的系统是静态系统。其中,在任何时刻 t 的电流值仅依赖于该时刻的电压值。

$$I(t) = \frac{1}{R} V(t) \quad (4.3)$$

动态系统是有记忆系统。如果一个系统在任一时刻的输出不仅与该时刻的输入有关,而且与该时刻之前的输入有关,则称之为动态系统。例如,包含有储能元件如电感、电容、弹簧等的系统是动态系统。在动态系统中,当输入停止后,储能元件所储备的能量使得系统继续发生运动。

就静态系统与动态系统的关系而言,现实系统实际上都是动态系统,而静态系统只是现实系统的一种近似处理。因此,在系统研究中通常把动态系统当作现实系统的一般情形,把静态系统当作动态

系统的特例。

静态系统表示固定时间上的输入和输出关系,输入和输出之间没有时间滞后,通常用代数方程表示。动态系统则以时间作为独立变量,输入与输出之间有时间滞后,通常用微分方程、差分方程或积分方程表示。例如,一个动态系统可表示为

$$\begin{aligned} x(t+\Delta) &= f(x(t), u(t), t) \\ y(t) &= h(x(t), u(t)) \end{aligned} \quad (4.4)$$

其中, x 为状态变量, u 为输入, y 为输出, t 为时间, Δ 为时滞。这一动态系统可示为图4—10。

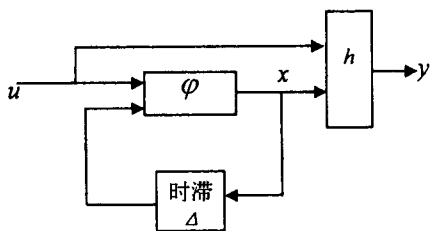


图 4—10 动态系统

动态系统又可分为时不变系统(亦称定常系统)和时变系统。在时不变系统中,当系统的输入函数平移一段时

间 Δ 后,系统的输出也平移同样一段时间,即系统的输出满足

$$y(t, t_0, x_0, u[t_0, t]) = y(t + \Delta, t_0 + \Delta, x^{\Delta} u(t, t)) \quad (4.5)$$

其中, x^{Δ} 表示 $u(t - \Delta)$; $u(t - \Delta)$ 的图像是 $u(t)$ 的图像沿 t 轴正方向平移 Δ 的结果; Δ 为任意正实数。也就是说,系统无论在何时,由同样的输入得出相同的输出,就称为时不变系统,否则就称为时变系统。

显然,就现实的动态系统而言,时变系统是一般情形,而时不变系统是时变系统的特例,或者说,是一种近似处理。

4.3.4 线性系统与非线性系统

系统根据其输入与输出之间的关系是否满足迭加原理,可分为线性系统和非线性系统。

线性系统,是指把系统的输入线性迭加时,系统的输出也能线性迭加的系统。在线性系统中,输入 u 与输出 y 之间有下列关系:

$$\begin{aligned}
 u &\rightarrow y \\
 u_1 &\rightarrow y_1 \\
 u_2 &\rightarrow y_2 \\
 &\vdots \\
 u_n &\rightarrow y_n \\
 u_1 + u_2 + \cdots + u_n &\rightarrow y_1 + y_2 + \cdots + y_n \\
 au &\rightarrow ay
 \end{aligned}$$

例如,考虑系统

$$\frac{dy}{dt} = ay + bu \quad (4.6)$$

其中, y 与 u 为在时间轴上定义的实函数, a 与 b 为实数。这一微分方程可表示如图 4—11 所示的线性电路。设与 u 对应的解为 y , 与 u' 对应的解为 y' , 则

$$\frac{d(y + y')}{dt} = a(y + y') + b(u + u') \quad (4.7)$$

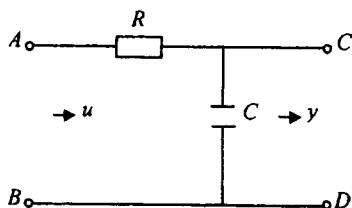


图 4—11 线性电路

可知,与 $(u + u')$ 对应的解为 $(y + y')$ 。同样,与 au 对应的解为 ay , 此处 a 为实数。

当然,满足迭加原理的系统为线性系统的先决条件是初始值的集合应遵循线性代数。

非线性系统,是指系统的输入—输出关系不满足迭加原理的系统。例如,电路的参数(如电阻、电感、电容)随电流或电压的大小及方向改变而改变时,就称为非线性

性电路。又如,用直线方程

$$y(t) = y_0 + k_0 u(t) \quad (4.8)$$

所描述的系统是非线性的,因为

$$h(ku(t)) = y_0 + k k_0 u(t)$$

$$k h(u(t)) = k[y_0 + k_0 u(t)]$$

$$h(ku(t)) \neq k h(u(t))$$

一般来讲,非线性系统的数学表达式中都含有一个或多个非线性项。

严格地讲,在现实中不存在真正的线性系统。现实系统一般都含有各种非线性因素,如感受器的阈值、效应器的疲劳、测量元件的不灵敏区、放大器的饱和等。即使是一个线性电阻器,当施加的电压超过一定阈值时,其物理性质也要发生变化,从而不满足线性要求。因为非线性微分方程至今没有通用的准确解法,所以在较大范围内最好用非线性模型表示的系统,当它的变量保持在一定数值范围内时,往往近似表示为线性系统,而这种线性模型通常具有很高的准确度。但是,对大量的复杂系统而言,非线性因素所起的作用又不能忽略不计,尤其在问题涉及到系统进化时更是如此。非线性相干作用是系统进化的一个重要条件。对此,我们将在第七章详细讨论。

4.3.5 连续系统与离散系统

通俗地说,如果系统状态是连续变化的,或者对于输入的连续变化,输出也呈现连续变化,则称之为连续系统;如果系统状态的变化是不连续的,或者对于输入的连续或不连续变化,输出呈现不连续变化,则称之为离散系统,或不连续系统。

用数学语言来讲,当系统的状态集 X 、输入集 U 及输出集 Y 是离散集合时,就称之为离散系统;当 X 、 U 及 Y 是 R^K (R 为实数集)中

的开集时,就称之为连续系统。

在系统研究中,十分重要的问题是从系统动态过程与时间的关系上考察系统的连续性和离散性。如果用来描述系统的时间函数 $f(t)$ 的定义域是连续的,即 $t = (-\infty, +\infty)$ 或 $(t_0, +\infty)$, 则称该系统是连续时间系统;如果 $f(t)$ 的定义域是离散的,即 $t = t_1, t_2, \dots, t_n$, 则称该系统是离散时间系统。

在连续时间系统中,系统的输入、输出和状态变化是时间的连续函数,可用微分方程描述。但在离散时间系统中,系统的输入、输出和状态变化是各离散时刻的值,需要用差分方程表示。这两类系统的状态变量模型是:

(1) 连续时间系统模型

$$\begin{aligned} x(t) &= f\{x(t), u(t), t\} \\ y(t) &= h\{x(t), t\} \end{aligned} \quad (4.9)$$

(2) 离散时间系统模型

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f\{x(k), u(k), k\} \\ y(k) &= h\{x(k), k\} \end{aligned} \quad (4.10)$$

图 4—12 和 4—13 分别给出离散时间动态系统和连续时间动态系统的例子。

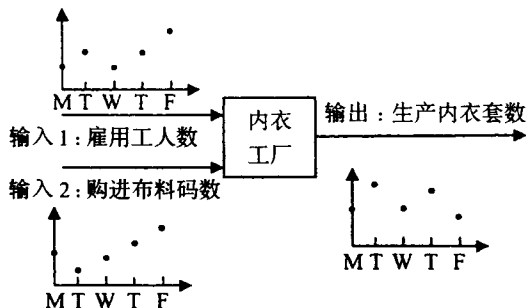


图 4—12 离散时间动态系统一例

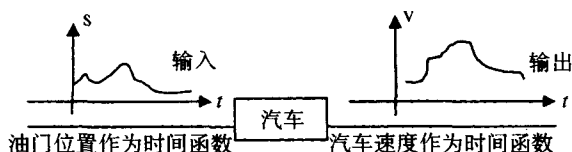


图 4—13 连续时间动态系统一例

连续时间系统已在许多领域,尤其在物理系统领域取得了很大发展。而离散时间系统理论正在广泛应用于社会、经济及许多工程系统领域,如自动机、脉冲控制、采样调节、数值控制等。

4.3.6 确定性系统与不确定性系统

考虑系统表达式

$$S = \{X, U, Y, \delta, \beta\} \quad (4.11)$$

其中, X : 状态空间; U : 输入空间; Y : 输出空间; δ : 系统动态, 即状态转移函数, 表示系统状态随时间的变化; β : 输出函数, 表示系统状态与系统输出之间的关系。

根据上式, 可将系统分为确定性系统与不确定性系统。

(1) 确定性系统: 系统的实时输入和实时状态能明确惟一地决定下一个状态和实时输出。可表示为

$$\left. \begin{aligned} S &= \{X, U, Y, \delta, \beta\} \\ \delta: X \times U &\rightarrow Y; x_{t+1} = \delta(x_t, u_t) \\ \beta: X &\rightarrow Y; y_t = \beta(x_t) \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

(2) 不确定性系统: 系统的实时输入和实时状态不能明确惟一地决定下一个状态和实时输出。即是说, 在不确定性系统中, 被决定的只是一些可能状态的集合或一些可能输出的集合。可表示为

$$\left. \begin{aligned} S &= \{X, U, Y, \delta, \beta\} \\ \delta: X \times U &\rightarrow P(X); x_{i+1} \in \delta(x_i, u_i) \\ \beta: X &\rightarrow P(Y); y_i \in \beta(x_i) \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

其中 $P(X), P(Y)$ 表示 X, Y 的一切子集的集合。当 X 有 n 个有限元时, $P(X)$ 有 2^n 个元。例如, 若

$$X = \{a, b, c\}$$

则 $P(X)$ 有 2^3 个元, 即

$$P(X) = \{\varphi, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\}\}$$

一般, 设 A 为 X 的子集, 则

$$P(X) = \{A | A \subseteq X\} \quad (4.14)$$

不确定性又至少可以分为两种: 随机性和模糊性。所谓随机性, 是指表示事件发生的不确定性。例如, 一只口袋装有四个颜色不同, 但大小、形状、重量完全一样的球, 从袋中任取一球, 究竟哪个球被取出, 显然是随机的。这时, 我们称由这四个球组成的体系具有随机性。与此不同, 所谓模糊性, 是指所表述的事件在含义上的不确定性, 亦即表述事件的概念或命题在内涵和外延上的不确定性。在人的思维、行为和语言中存在着这种不确定性, 而且人是擅长于利用这种不确定性进行各种活动的。例如, 天气预报“明天有 90% 的可能是阴天”。这里, 90% 表示事件“阴天”发生的不确定性, 是对事件随机性的描述, 而事件“阴天”含有天气分类上的模糊性, 阴天与晴天的界限是不分明的。

这样, 根据随机性和模糊性概念, 不确定性系统可分为随机系统 (或称概率系统) 和模糊系统。

(i) 随机系统: 在不确定性系统中, 如果根据系统的实时输入和实时状态能确定下一个状态或实时输出的概率分布, 则称之为随机系统; 否则就称之为非概率不确定性系统, 这时被决定的不是下一个状态或实时输出的概率分布, 而只是其可能状态或可能输出的集合。

例如,上面给出的不确定性系统表达式中,如能知道 x_{t+1} 属于 $\delta(x_t, u_t)$, y_t 属于 $\beta(x_t)$ 的概率,就可以把该不确定性系统看作是随机系统;否则只能视之为非概率不确定性系统。

(ii) 模糊系统:在非概率不确定性系统中,那些含有模糊性的系统称为模糊系统。也就是说,在不确定性系统中,将状态变量、输入和输出都作为子集来考虑,然后把这些子集都改换为各自的模糊子集,就得到模糊系统。模糊系统在模糊输入的作用下,由一模糊状态向另一模糊状态转移,并产生模糊输出。这样,模糊系统可表示为

$$\left. \begin{aligned} S_f &= \{X, U, Y, \delta, \beta\} \\ \delta: F(X) \times F(U) &\rightarrow F(X) \\ x_{t+1} &= \delta(x_t, u_t), \\ u_t &\in F(U), x_t, x_{t+1} \in F(X) \\ \beta: F(X) &\rightarrow F(Y) \\ y_t &= \beta(x_t), x_t \in F(X), y_t \in F(Y) \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

其中, x_t, x_{t+1} 分别为时刻 $t, t+1$ 的模糊状态, u_t 为时刻 t 的模糊输入, y_t 为时刻 t 的模糊输出。

不难看出,在模糊系统中,系统的状态不是状态空间中的一点,而是它的模糊子集;对于下一个系统状态,不知其概率分布,只知其关于给定子集的隶属度。

这里,模糊子集 A 是用隶属函数 μ_A 定义的。我们把研究对象的全体称为论域,用大写字母 $X, Y, \dots$ 表示。论域中的每个对象称为元素,用小写字母 $x, y, \dots$ 表示。那么, $x \in X, y \in Y, \dots$ 。在普通集合中,一个元素是否属于其子集,只有两种答案。例如,如果

$$X = \{x\}, P(X) = \{A | A \subseteq X\}$$

则特征函数 μ_A 有

$$\mu_A = \begin{cases} 1: & x \in A \\ 0: & x \notin A \end{cases}$$

或者

$$\mu_A: X \rightarrow \{0,1\}$$

但是,在模糊集合中,将普通集合的特征函数(亦可称为隶属函数)扩展到整个 $[0,1]$ 实数轴上取值,即模糊集合的隶属函数 μ_A 是论域 X 到 $[0,1]$ 的映射:

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$$

因此,在模糊集合中,一个元素是否属于一个子集可能有无穷多个回答。隶属函数 μ_A 在 x 的值 $\mu_A(x)$ 称为 x 对 A 的隶属度,表示元素 x 隶属于模糊子集 A 的程度; $\mu_A(x) = 1$ 表示 x 确实属于 A ; $\mu_A(x) = 0.8$ 表示 x 八成是属于 A 。这样,模糊子集通常可写成

$$A = \int x \mu_A(x) / x \quad (4.16)$$

或写成离散形式

$$A = \{ \mu_A(x_1) / x_1, \mu_A(x_2) / x_2, \dots, \mu_n(x_n) / x_n \}, \quad (4.17)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \in x$$

例如,在图4—14中,

$$A_2 = \{0/0, 0.2/1, 0.6/2, 1/3, 0.6/4, 0.1/5\}$$

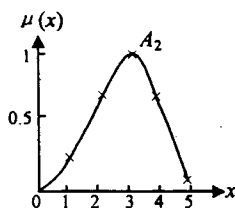


图4—14 模糊子集 A_2

在模糊集合、模糊语言、模糊逻辑等概念基础上,模糊系统理论已取得了迅速的发展。在与人类思维及行为有关的几乎所有领域,诸如模式识别、自动控制、故障诊断、人工智能、行为科学等领域,模糊系统理论已经取得了初步的成果,而重要的是它为进一步的发展奠定了基础。

4.3.7 黑色系统、白色系统与灰色系统

系统根据其“颜色”可分为黑色系统、白色系统和灰色系统。这里,“颜色”是指研究者对系统状态(或系统内部结构与过程)的认识

程度。在灰色系统理论产生之前,在系统理论领域将这三种系统分别称为黑箱、白箱和灰箱;不过,只是对白箱和黑箱有了系统的理论,而对灰箱问题尚未建立系统的理论。因此,灰色系统理论的提出的确是一个重要的贡献。

(1) 黑色系统:一个系统如果只知道其输入—输出关系,而不知道实现输入—输出关系的系统结构与过程,就称其为黑色系统。例如,在心理学的“刺激—反应”模型中,给一个生物体以某种刺激,就得到某种反应,但不知道这个刺激是怎样转换为这个反应的,也不知道实现这种转换的内部结构,这时这个生物体就被当作一个黑色系统。经典控制论所处理的是这种黑色系统。

(2) 白色系统:如果不仅知道一个系统的输入—输出关系,而且知道实现输入—输出关系的系统结构与过程,就称这一系统为白色系统。例如,对一台电子仪器不仅知道输入与输出之间的对应关系,而且知道产生仪器效能的全部内在结构和内部机制,这时这台仪器就被看作是一个白色系统。现代控制理论所处理的是这种白色系统。

(3) 灰色系统:当我们对一个系统实现其输入—输出关系的结构与过程只有部分的知识,尚无全面的知识时,就称之为灰色系统。不难看出,作为人的认识对象的大量系统,尤其是复杂系统,其实都可以看作灰色系统。

灰色系统理论以灰数、灰方程、灰矩阵、灰群等概念研究和描述灰色系统。

所谓灰数,是指只知道其部分性质,不知道其他性质的数,以 $\otimes$ 表示。例如,一棵生长在地上的大树的重量、一个人的年龄、一个系统的预测值等都是灰数。

灰数可分为有上界而无下界的灰数,有下界而无上界的灰数,以及既有上界又有下界的灰数即区间灰数。例如,一棵生长在地上的大树,其重量是有下界的灰数,因为其重量必大于零,这是下界。某

电气仪表的测量范围是有上界的灰数。

根据灰数的取值域即灰域,又可把灰数分为连续灰数和离散灰数。例如,某灰数的取值范围为 $[0, \infty]$,它就是连续灰数。某人的年龄在 20 至 25 岁之间,即可能是 20 岁、21 岁、22 岁、23 岁、24 岁或 25 岁,因此年龄是离散灰数。

所谓灰方程,是指含有灰系数(灰元)的方程。例如,

$$2x + 1 = 0 \quad \text{白色方程}$$

$$\otimes x + 1 = 0 \quad \text{灰色方程}$$

如果 $\otimes$ 在有界灰域内离散取值,上面的灰方程就代表有限个方程;如果 $\otimes$ 在灰域内连续取值,则代表无穷多个方程。例如,

$$\otimes x - 1 = 0, \otimes \in \{1, 2\}$$

则

$$x \in \{0.5, 1\}$$

如果 $\otimes$ 在 1 与 2 之间连续取值

$$\otimes x - 1 = 0, \otimes \in [1, 2]$$

则

$$x \in [0.5, 1]$$

所谓灰矩阵,是指含有灰元的矩阵。例如,

$$A(\otimes) = \begin{bmatrix} \otimes_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

其中 $\otimes_{11}$ 表示灰元,如它被 a_{11} 取代,就变成白化矩阵。

考虑到人们所研究和处理的大量系统(如社会、经济、文化等系统)可视为灰色系统,灰色系统概念和理论有着广阔的发展前景。

4.3.8 简单系统与复杂系统

这几年,“复杂系统”、“复杂性”等概念引起诸多学科研究者的广泛重视。人们通常把系统分为简单系统和复杂系统。但是,遗憾的

是,至今还没有关于复杂性和复杂系统的令人满意的定义,因而我们还不知道简单系统和复杂系统的严格界限在哪里。另外,当人们使用“简单系统”和“复杂系统”概念时,是指现实系统本身还是指系统模型,也不相一致。

下面先介绍三种不同看法。

(1) 弗雷士曼(Б. С. Флейшман)根据现实系统行为的复杂程度,把各种系统分为自动系统、决策系统、自组织系统、预见系统和转换系统,从而把自动系统看作是简单系统,其余系统看作是复杂系统。自动系统对外界的反应是确定的,它的内部结构能从偏离平衡状态自动地过渡到平衡状态。太阳系、原子和钟表等被视为简单系统。

这一看法的不妥当性是显而易见的。例如,基本粒子物理学的发展告诉我们,原子不是一个质点,也不是一个刚体,而是一个具有复杂内部结构的系统。

(2) 罗申(Robert Rosen, 1934—1998)关于复杂性与复杂系统的观点是值得介绍的。他把各种系统分为自然系统和形式系统。前者是指由我们所要研究的外部世界的某些方面所构成的各种系统。例如,一块石头、一颗星、太阳系、生物体、蜂房、生态系统,是自然系统。城市、工厂、汽车等也是自然系统。所谓形式系统,则是我们为表示和模拟自然系统而创造的各种系统。

与试图从一个系统或一种系统描述的内在属性中把握复杂性的流行观点不同,罗申认为:复杂性既不是系统的内在属性,也不是系统描述的内在属性。复杂性是与我们同系统相互作用方式的数目有关的。因此,复杂性不仅是系统互动性的函数,而且是我们自己的函数。例如,如果我们以少数几种方式与一个自然系统相互作用,则该系统是简单的;如果我们以多种方式与一个自然系统相互作用,则该系统是复杂的。人们通常说一块石头是简单系统,而一个生物体是

复杂系统,这是因为我们通常只以少数几种方式与石头相互作用,而我们常用许多方式与生物体相互作用。当我们增加与石头的相互作用方式数目时,它的复杂性就增加。对于一个地质学家来说,石头被看作是无限复杂的。相反地,当我们限制与石头的相互作用方式数目时,它就变得很简单。

这样,在罗申看来,所谓简单系统,是指根据用来规定状态变化的力学规律,能以单一的状态空间给出完整描述的系统;否则就是复杂系统。因此,力学系统是简单系统,生物、社会等系统是复杂系统,微观物质系统因服从测不准关系,因而也是复杂系统。也就是说,他把牛顿范式能完全而永久地适用的自然系统称为简单系统,把那些由于某种原因致使牛顿范式失效的自然系统称为复杂系统。

罗申关于复杂性具有相对性的观点是可取的。但是,他要把现实系统分为简单系统和复杂系统的尝试并未获得成功。实际上,在牛顿范式和力学系统中出现的并不是现实物质系统,而是这些系统的模型。任何物质系统原则上都包含有无穷多个方面,即使在其中每个方面都可以用简单系统模型表示的情况下,也不能否认这些系统本身是复杂的。就现实系统而言,无法区分简单系统和复杂系统。但是在系统模型中,我们可根据系统是否遵循牛顿范式区分简单系统和复杂系统。例如,那些可积、甚至可解的力学系统属于简单系统,而那些不可积的系统却属于复杂系统;前者稀如凤毛麟角,后者多如牛毛。由于混沌等现象的发现,我们已知道那些含有内在随机性的确定性方程所表示的系统也是复杂系统。一切复杂系统都含有某种不确定性。

(3) 与上述两种意见不同,不是从系统行为的复杂程度或系统描述的复杂程度出发区分简单系统和复杂系统,而是直接从系统结构的复杂程度出发区分简单系统和复杂系统。

系统结构的复杂性被视为取决于两个因素,其一是系统内的要

素数目,其二是要素与要素之间的关系数目。系统的复杂度就表示为系统内要素之间的实际关系数目和可能的最少关系数目之比,即

$$C = \frac{m}{n-1} \quad (4.18)$$

其中 C :复杂度; m :实际关系数; $n-1$:可能的最少关系数,等于要素数 n 减去 1。由此认为:

当 $C=1$ 时,称该系统为简单系统;

当 $C>1$ 时,称该系统为复杂系统。

据此,系统内即使有大量要素,如它们之间的关系数很少,也可以是简单系统;相反,即使系统含有的要素不多,但是它们之间的关系数多,也就可以是复杂系统。例如,图 4—15 所示的系统是简单系统,因为

$$C = \frac{m}{n-1} = \frac{4}{5-1} = 1$$

但是,图 4—16 所示的系统是复杂系统,因为

$$C = \frac{m}{n-1} = \frac{3}{3-1} = 1.5 > 1$$

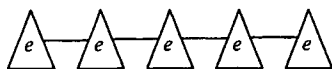


图 4—15 简单系统一例

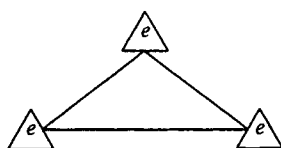


图 4—16 复杂系统一例

这一观点简单明了。但是,仅以 m 和 n 定义系统结构的复杂度,也有不妥之处,因为系统结构的复杂性不仅与系统内要素数与关系数有关,而且与要素的多样性、关系的多样性(如关系的意义、关系的强弱、关系的类型如串联或并联、前馈或反馈等)有关。例如,对力学系统来讲,要成为一个复杂系统,一个必要条件是质点数不得少于

三,但是在社会系统中由两个人组成的系统完全有可能是一个复杂系统。

总之,简单系统和复杂系统的概念虽然用得非常广泛,但是至今还没有严格定义。应该认为:第一,简单系统和复杂系统的概念,只有在系统模型研究中才能有严格定义;一切现实系统既可把它简化为简单系统,亦可把它看作复杂系统。第二,就现实系统而言,简单性和复杂性是一对相对的概念,两者之间并不存在绝对的界限;两者的划分与其说是取决于系统的内在特征,不如说是取决于人的研究方式和研究能力。第三,线性的、少组元的、单层次的、单目标的系统通常被看作是简单系统,非线性的、多组元的、多层次的、多目标的系统通常被看作是复杂系统,但是这种观点只是常识性的理解,并不是严格科学性的理解;在实际的研究中,更重要的是具体研究具体问题。

*

*

*

本章根据系统分类的三个原则,即单一性原则、加和性原则和客观性原则,按照一系列的分类标准,对各种各样的具体系统和系统模型进行了分类。当然,我们还可以按照其他的分类标准进行系统分类。

这些分类显然是对各种具体系统或系统模型在某个特定意义下的抽象。现实系统并非仅以上面所列举的各种系统类型中的某一类型而存在,而往往以它们的相互交叉、相互并合和相互渗透作为复合系统存在。所谓复合系统,是指一个系统具有上述分类中两种或两种以上的系统类型特征。存在着各种各样的复合系统,如自然系统可分为天然的自然系统和人造的自然系统,概念系统可分为关于社会的概念系统、关于自然的概念系统和关于思维的概念系统,等等。

另一方面,我们不能仅以上述系统模型分类中的某一类型来建立一个现实系统的完整模型。为了对一个现实系统建立比较完整的

系统模型,我们必须综合上述系统模型分类标准中的各种特征,建立复合模型。所谓复合模型,是指一个系统模型具有上述系统模型分类标准中两种或两种以上的特征。存在着各种各样的复合模型,如连续时间线性定常系统或离散时间非线性时变系统,多变量多输入多输出多目标系统或单变量单输入单输出单目标系统,等等。

复合系统或复合模型的概念要求我们对每一个具体系统要从系统的各方面实际内容和各方面特性去考察。尤其是在人类改造现实世界的实践活动中以及在为现实系统建立复杂系统模型时更是如此。

第五章 系统性质

一个研究对象,不管它是一台机器还是一个原子,不管它是一个细胞还是一个国家,只要被看作是一个系统,它就会具有作为系统应该具有的一些基本的系统性质。本章的目的就在于讨论各种系统所共同具有的基本性质,其中包括整体性、稳定性、适应性、等级性和历时性。这些性质对于系统的存在与变化十分重要,因而对系统研究也非常重要。

5.1 整体性

5.1.1 整体性

爱因斯坦为建立相对论从伽利略那里借来了相对性原理,相仿地,贝塔朗菲为建立一般系统理论从亚里士多德那里借来了整体性原则:“整体大于各部分之和。”自那以后,整体性一直被看作是系统的最基本的性质,并且一直沿用贝塔朗菲的表述方式^①。

但是,“整体大于各部分之和”的表述方式却导致了人们对系统整体性的各种误解。不少人在“整体”和“各部分之和”的大小问题上

① 自从 20 世纪 70 年代末贝塔朗菲一般系统理论传入中国以来,许多学者为了寻找亚里士多德的原话作了不少努力。但是,从亚里士多德的著作中都未能找出“整体大于各部分之和”这样一句话。由此看来,亚里士多德可能没有说过这样一句话,这也许是贝塔朗菲对亚里士多德思想的一种概括。

大做文章。甚至出现了这样一种描述方法： $\phi(x+y) > \phi_x + \phi_y$ ；如取 $\phi=2$ ，则 $(x+y)^2 > x^2 + y^2$ 。为了消除对整体性的这种简单化，我们首先要指出下列两点：

第一，要比较两个对象的大小，必须有同一的单位，而整体和部分的单位某些是相同的，某些是不同的。对那些单位不同的量就无法比较其大小，也就无法谈论“整体”同“各部分之和”相比究竟谁大谁小。

第二，对那些单位相同的量而言，“整体”与“各部分之和”之间存在着三种关系：前者大于后者，如“三个臭皮匠，赛过诸葛亮”；前者等于后者，如一筐苹果的重量等于各个苹果的重量之和；前者小于后者，如“一个和尚挑水吃，两个和尚抬水吃，三个和尚没水吃”的故事所示。

由此可知，讨论系统的整体性，必须力求把握整体性的实质。根据整体性，一个系统就是一个整体，它不仅作为一个整体而存在，而且作为一个整体而运动。整体内部各部分之间、各部分与整体之间存在着某种特定关系。这种关系使各个部分成为由它们所构成的整体的部分，使同样一个对象物在某一整体中的活动有别于在另一整体中的活动或游离状态下的活动。例如，一个原子在游离状态下的运动不同于它在一台机器中的运动，它在一台机器中的运动不同于它在人脑中的运动，而它在一个恶人头脑中的运动又不同于它在一个善人头脑中的运动。

贝塔朗菲曾经指出：在数学上当以微分方程组表述一个系统时，整体性是指系统任一要素的变化是系统所有要素的函数，而每一要素的变化引起其他所有要素以及整个系统的变化；从实质上看，整体性是指系统具有各要素所没有的“新的”性质和行为方式。^①

因此，我们可以把整体性理解为使一个系统作为一个整体存在的那种性质，这种性质有别于其各部分的性质或各部分性质的堆积。

① Bertalanffy L. v. Zu einer allgemeinen Systemlehre. *Biologia Generalis*, 1949. (19)

即是说,系统的整体性可表述为系统的质不同于各要素的质或各要素的质的堆积。显然,系统的整体性是在系统层次上突现的,是在各要素的相互关系中生成或存在的。

5.1.2 系统质与要素的四因素

以上的讨论促使我们探讨系统的质是怎样被规定的,亦即系统的诸要素及其关系怎样规定系统的质。

一、多样性公设与相对性公设

为了讨论系统的诸要素及其相互关系如何规定系统的质,我们需要逻辑推理的出发点。为此,我要引入两个基本公设即多样性公设与相对性公设。

1. 多样性公设:不能把一切质的差异归结于量的差异,即质的多样性是对象世界的固有属性。

2. 相对性公设:不存在区别质和量、质变和量变的绝对标准,即质和量、质变和量变依所选取的参照系不同而具有不同含义。

多样性公设

我们可以在黑格尔和恩格斯那里读到关于多样性公设的论述。

黑格尔指出:“为了寻求严密彻底的科学知识,我们必须指出,像经常出现的那种仅在量的规定里寻求事物的一切区别和一切性质的办法,乃是一个最有害的成见。”^①

恩格斯指出:不能“用量的差异来说明一切质的差异”,亦即不能“把质的差异归结为同一的最小粒子的结合所造成的纯粹量的差异”。^②

① 黑格尔. 小逻辑. 北京:商务印书馆,1980. 221

② 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 231

多样性公设的事实根据来自人类的经验与科学的成就。物理学为此提供了最丰富的佐证。从古希腊时代起,人们一直在寻求世界的“始原”。每一时代的人都未能如愿以偿,但后继的一代仍不罢休,探索周而复始。好奇心从未得到满足,但科学却大踏步地前进了。“不可分的”原子分成原子核与电子,原子核又分成质子、中子与介子,接着所有强子被看作是由多种夸克子和胶子构成的。人们现已普遍认识到千差万别的物质形式不可能有同一的不可分的物质始原。著名物理学家格拉肖(Sheldon Lee Glashow, 1932—)曾设想比夸克和轻子更基本的组元是“毛粒子”,而不再是某种始原性的粒子^①。

物质存在形式的质的多样性一经被理解为物质本身的固有属性,那么在式(5.1)中,各要素的质 Q_i 作为预先给定的项包含于系统质 Q_s 的关系式就成为理所当然的。各要素的质 Q_i 又可表示为与系统质 Q_s 相似的形式。这种还原操作可以继续下去,而不管我们表述哪一层次的系统的质,相应的关系式中总是要含有表示其要素质的项。显然,这种描述只有在多样性公设的支持下才是可能的。

相对性公设

恩格斯曾经指出:“在自然界中,质的变化”“以对于每一个别场合都是严格地确定的方式进行。”^②由此可知,质和量、质变和量变在每一个别场合都是严格地确定的。例如,水、冰和水蒸气,从聚集状态上看,是不同质的物,但从化学成分上看都是 H_2O ,不存在任何质的差别。说两个对象是同质或异质的,只有对某一参照系而言才有意义;同样地,说某一现象是量变或质变,也是只有对某一参照系

① 格拉肖 S.L. 物质的统一和相互作用的统一. 自然杂志, 1980. (8)

② 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社, 1971. 47

而言才有意义。就是说,不存在一个绝对优势的参照系,用来判别任意两个对象是同质的或异质的,某一任意选取的现象是质变还是量变。

把同质的相对性跟爱因斯坦所说的同时的相对性作比较是有意義的。他认为:“我们不能给予同时性这概念以任何绝对的意义;两个事件,从一个坐标系看来是同时的,而从另一个相对于这个坐标系运动着的坐标系看来,它们就不能再被认为是同时的事件了。”^①在我们这里,从一个参照系看来是同质的两个对象,从另一个参照系看来就完全可以成为异质的对象。

实际上,多样性公设和相对性公设不仅为研究系统质与要素之间的关系问题提供逻辑上的出发点,而且对其他许多科学与哲学问题也具有同样的重要性。

二、系统质与要素的四因素

世界上存在着各种不同质的系统。首先,不同的系统等级之间有着质的差异,一个层次的系统质不同于另一层次的系统质。例如,生物个体和生物群体之间、生物群体和生物群落之间有着质的差异。其次,在同一系统等级中有着不同类型系统之间的质的差异。例如,在生命系统的生物体这一层次中,已知的动物有 100 多万种,植物有 30 多万种。最后,在相同类型系统的各个系统个体之间有着质的差异。例如,全世界 60 多亿个人中没有任何两个人是完全相同的。讨论各种具体系统的质及其产生原因是各门具体科学的任务。在系统学中,我们需要用某种普适方式来说明系统质是怎样由要素来规定的。

这里,我们把要素在规定系统质时的作用因素分为四种,即要素的质、数量、运动量与排列次序,来说明系统的质及其变化。

① 爱因斯坦文集(第 2 卷). 北京:商务印书馆,1977. 89

1. 系统质与要素质

不同质的要素必定构成不同质的系统,亦即系统的要素不同,系统的质就不同。例如,核子和电子的区别,无机物和有机物的区别,植物和动物的区别,蜜蜂“社会”和人类社会的区别,都由此而来。所以当我们比较任意两个系统时,只要它们的组成成分不同,就可断定它们在质上必有差异。

或许会有这样的疑问:两个系统,虽然其组成成分不同,但在特定范围内两者的功能是相同的,如同在热电高温计与气体高温计、人与机器人、电子计算机与人脑的对比中所看到的那样。这样的两个系统能否从功能上看成是同质的系统呢?这当然是可以的,但是这仅仅是功能上的而且是特定范围内的功能上的同质性。功能上的同质性不能与系统本身的内同质性相混淆,而两个系统只要其组成成分不同,从总体上看,它们之间的异质性仍然是一目了然的。

2. 系统质与要素量

其次,当系统的组成成分(要素种类)相同时,系统的质的差异基于组成成分(各种要素)的量的差异。这里有如下三种理想情形:

(1) 由相同组成成分构成的两个系统,如果其所含要素的数量不同,就有可能构成两个不同质的系统。例如,CO 和 CO₂ 都由 C 和 O 构成,但后者比前者多一个 O,而两者的质绝然不同。在正烷属烃系列的化合物(C_nH_{2n+2})都只含有 C 和 H,但随着 n 增大,后者总比前者多一个 CH₂,而所得的化合物各具不同的质。在生物学中,虽然 DNA 含量并非总是跟生物的复杂程度成正比,但从总的趋势来看,越是高等的动物,DNA 含量越多。当然,不同的要素有不同的计量单位。

(2) 如果两个系统的要素种类相同,每两个对应要素的数量也相同,但这些要素所具有的运动量不同,则有可能构成两个不同质的系统。例如,在各种同素异性状态和一物的不同聚集状态中就能看

到这种现象。异氰酸银(AgNCO)和雷酸银(AgONC)都由一个 Ag、一个 O、一个 N 与一个 C 组成,但两者的质完全不同,前者性质稳定,后者具有爆炸性。这种差别与两者的每两个对应原子所含能量的差别有关。又如,石墨和金刚石都由碳组成,但两者的质大有区别。石墨属六方晶系,晶体呈六方板状或片状,集合体为鳞片状,而金刚石属等轴晶系,呈八面体晶体,晶面常鼓起成球面;两者的质的差异基于碳原子所含能量的差别。在一定条件下金刚石可转化为石墨,石墨亦可转化为金刚石。在 1799 年,人们已成功地把一颗金刚石转变成石墨,而在 1962 年,人们已能在 2000000 个大气压、5000℃ 的温度下不使用催化剂而使石墨直接转变成金刚石。

这里特别要注意的是,我们所说的“运动量”在不同系统中或对于不同要素有不同的含义和度量单位。例如,在物理系统中它可以是指能量或动量等,在科研系统中它可以是指社会对科学的需要和科学家的思维能力大小等。

(3) 当两个系统的要素种类相同,每两个对应要素的数量和它们所具有的运动量也相同时,两个系统的质的差异则基于各要素排列次序的不同。

在理论上,这一结论根据如下两点:第一,任一系统都有内在有序性。系统的内在有序性体现为系统结构与系统功能;系统结构是要素的秩序,即各要素排列次序的总体,而系统功能是要素活动的秩序,即各要素活动排列次序的总体。人们通常所说的混沌,也不是单纯的“无序”或“混乱”,而是指没有明显的周期和对称,但具有丰富的内部层次的特殊的“有序”状态。要素的排列次序不仅要从空间分布上考察,而且要从时间分布上考察。一个系统如果完全丧失其内部有序性,就不成其为系统。第二,与要素相统一的结构规定并表征系统的质,但是要素的排列次序本身对要素而言,不是质的因素,而是量的因素,它不改变要素的存在或质。例如,一个氧原子(O)可参与

各种不同的含氧化合物,但是它作为氧原子的质并不因它所参与的化合物不同而不同。

在具体系统中,这一结论以各种事实为根据。最明显的例子是具有手性的系统^①,这些系统与其镜像不能通过旋转和平移而相互迭合。一对手性系统没有对称元素,如对称心、对称轴、对称面、旋转反映轴与旋转倒反轴等。例如人体中那些具有手性的一对器官(一双手、一双脚、一对耳朵等)便是如此。一个左旋螺钉和一个右旋螺钉,可以制造成其成分、质量和大小完全一样,但仅因螺旋方向不同而成为不同质的螺钉,互有不可替换性。这些手性物体的质的差异绝不是由于组成成分、要素数目和要素所具能量不同,而纯粹是由于要素排列次序不同。

目前,科学家们最感兴趣的手性系统是生物大分子。例如,蛋白质的基本组成单位氨基酸分子是一对手性分子,一种是 L 型,另一种是 D 型。这两个异构物的结构如图 5—1 所示。这两种氨基酸的

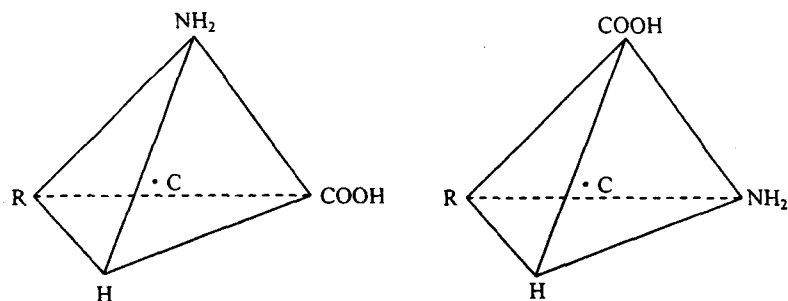


图 5—1 L 型及 D 型氨基酸

① 长期以来手性研究受到学界广泛重视。各方面的研究者怀着极大兴趣研究手性。文木, 手性之谜——左还是右, 三思科学(电子杂志), 2002, (11), <http://www.oursci.org/magazine/200211/021113-1.htm>

组成成分、每两个对应要素(原子或原子团)的数量和所含能量都完全等同,但只因其要素的排列方向不同而构成不同质的系统。除个别例外之外,生活在地球上的生物体只含 L 型氨基酸,不含任何 D 型氨基酸。

从上可知,系统的质由其要素的质、要素的数量、运动量和排列次序这四个因素规定。在一般情况下,系统的质通常由这四个因素的相互交错、相互作用而确定,从而形成千差万别的各种具体系统。这样,系统的质可表示为要素的质与量的函数:

$$Q_s = \Phi(Q_{e_i}, N_{e_j}, E_{e_k}, O_{e_l}) \quad (5.1)$$

其中 Q_s 为系统的质, Q_{e_i} 为各要素的质; N_{e_j} 为各要素的数量; E_{e_k} 为各要素的运动量; O_{e_l} 为各要素之间的耦合关系; i, j, k, l 为正整数。

5.1.3 系统与要素之间的三种关系

整体与部分之间的关系问题似乎是一个常识范围内的问题。但是,如在第一章的讨论中所看到的那样,为了弄清并科学地揭示整体与部分之间的关系,人类竟耗费了两千多年的漫长岁月。下面的讨论,作为第一章中关于整体与部分之间关系的讨论的重要补充,将更广泛地考察整体与部分之间的各种关系。

一、整体性:整体 $\neq$ 各部分之和

从以上的关于系统整体性、系统质与要素四个因素之间关系的讨论中可知,当我们把任何一个整体和它的各部分加以比较时,最引人注目的是,就某些性质而言,整体不等于它的各部分之和;从总体上讲,整体的质不同于各部分的质,整体的结构不同于各部分的结构,整体的功能不同于各部分的活动。整体的结构与功能、整体的总体特征是在整体层次上突现的。

系统整体性的根据在于系统内部各要素之间的耦合关系。用数学语言来讲,系统内部各要素之间的非线性关系和系统与要素之间

的非线性关系使得系统具有它的各要素所没有的一些新的性质。当一个系统溃散为它的各要素时,这些特性就随之消失。

贝塔朗菲在生物学、物理学和社会科学的广泛领域注意到系统的整体性,不仅为揭示生命的本质作出了贡献,而且为创立一般系统理论迈出了关键的一步。虽然人们在数学上把系统分为线性系统和非线性系统,但是从本质上看,任何具体系统都是非线性系统。

二、同一性:整体 = 部分

就某些性质而言,整体与部分具有同一性,即是说,就这些性质而言,整体等于它的各部分。其中最重要的是整体与部分之间的同型性,即整体与部分在其存在方式或运动方式上的一致性、类似性或相似性。在科学探索的不同领域,众多学者自觉或不自觉地利用这一同型性原理取得了巨大的成功。

在生命系统中,部分与整体的包容关系表现为系统等级。在细胞、器官、生物体、群体、组织、社区、社会、超国家系统的等级序列中,前者总是后者的组元。米勒注意到生命系统各层次之间的同型性,发现各层次的生命系统都含有复制器等 20 个分系统,从而为复杂多端的生命世界建立了统一的生命系统理论体系。

在经典几何学中我们看到的是规则而光滑的几何形状,但是在现实生活中我们经常看到的却是极不规则、极不光滑的几何形状,如起伏不平的山脉,弯弯曲曲的海岸线,变幻莫测的浮云,美丽多姿的雪花。曼德勃罗(Benoit B. Mandelbrot, 1924—)注意到这些几何对象之间、这些几何对象与其部分之间的同型性,发现如果将这些几何对象的一部分放大到原型的大小,其形状就与原型相同,或者说,一个分形的任何一个特定部分都是整体的缩影,见图 5—2 与图 5—3,进而为这些似乎是杂乱无章的几何对象建立了统一理论——分形几何学,详见附录 F. 3. 5。

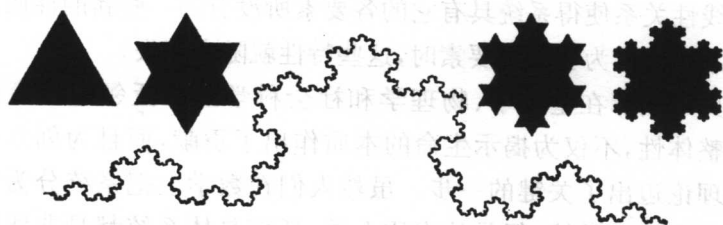


图 5—2 科赫(Niels Fabian Helge von Koch, 1870—1924) 曲线

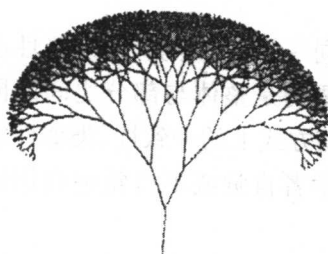


图 5—3 分形树

牛顿以来科学的一个基本信条是确定性过程必有确定性结果。但是在现实世界中,气象的变化、水龙头的滴水、流体的涡旋、脑电波的振荡等自然现象却告诉人们确定性过程可导致混沌运动。当人们决心驱散几百年来一直使科学界迷惑不解的混沌之雾的时候,又是整体与部分之间的同型性起

到了开路先锋的作用。费根包姆等人注意到混沌吸引子有无穷嵌套的自相似结构即套箱结构,发现多种混沌运动的内在有序性和同一性,进而为这些似乎是无章可循的“混乱”世界创立了统一理论——混沌理论(详见本书第七章 7.3.2 及 7.5.2)。

特别值得一提的是中国学者张颖清的成就^①。他通过对生物体整体与其部分的大量观察和分析比较以及实验,注意到生物体每一相对独立的部分在其化学组成的模式上与整体相同,是整体的成比例的缩小,发现生物全息律,进而创立了生物全息胚学说。例如,在人体中穴位分布与人体器官分布的对应关系就体现着整体与部分之

^① 关于张颖清的生物全息律和生物全息胚学说,参看 <http://www.eciwo.sdu.edu.cn>。至于有些人提出的“宇宙全息统一论”究竟在何种程度上是科学,似乎尚待研究。

间的同一性。每个穴位代表着人体的某个器官,人体器官的状态可反映在与之对应的穴位上,如图 5—4 所示。有趣的是,在每个相对独立的部分(如头部、上肢、下肢、手部、足部、耳部或其他),穴位的分布次序与人体内器官的分布次序是相同的,即都是“头、肺、肝、胃、腰、足”。这就表明,从信息上看,这些独立部分可视为整个人体的缩影。生物全息律在医学、生物学、农业、畜牧业等领域的成就为整体与部分之间的同型性原理提供了极为宝贵的素材。

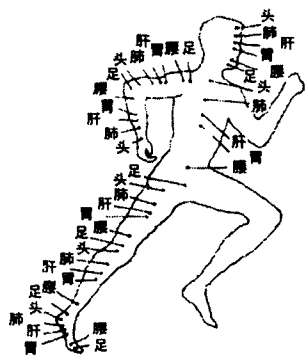


图 5—4 穴位分布的全息律

仅是这些,已足以使我们惊奇。目前风靡全球的几种新兴学科都以整体与部分之间的同型性为其基本依据和基本结论。

三、加和性:整体 = 各部分之和

除了“整体性”和“同一性”外,还有一点是不能忽略的,那就是加和性:就某些性质而言,整体等于各部分之和。例如,在科学上被称为容量性质的那些性质就具有加和性。整体的体积等于各部分体积之和,整体的质量等于各部分质量之和,整体的熵等于各部分熵之和,诸如此类。

整体具有加和性的根据在于各部分之间的线性关系或整体与部分之间的线性关系。在整体中,受线性关系制约的性质表现出加和性,受非线性关系制约的性质表现出非加和性。

由上可知,研究系统,我们既要把握系统的整体性,又要把握系统的加和性,还要把握系统与要素的同一性。或者说,我们既要重视系统内部的各种非线性关系,又要重视各种线性关系,还要重视系统与要素之间的同型性。

5.2 稳定性

5.2.1 稳定性

在研究和处理各种具体系统的时候,我们希望有些系统是稳定的。例如,我们希望恒温器在不同环境下能稳定输出,振荡器的幅值和频率在干扰的影响下尽可能保持不变,飞行器在恶劣气候下也能沿着预定轨道飞行。另一方面,我们希望有些系统不稳定。例如,我们希望那些腐朽的系统尽快消亡,不符合广大人民群众要求的社会制度尽快退出历史舞台,恶人尽快得到惩罚。所有这些问题,在科学上都被称为稳定性问题。

粗略地说,所谓稳定性,是指系统的结构与功能在涨落作用下的恒定性,亦即系统状态或状态序列或输入—输出关系在涨落作用下的恒定性。换言之,说一个系统是稳定的,是指该系统具有自身的度量规定,维持自己的质的规定性和量的规定性的统一,使涨落引起的量变不会越出引起质变的限界。

但是,任何具体系统的稳定性都是相对的,而不是绝对的。首先,任何具体系统不可能永恒地保持稳定,不可能“长生不老”,也就是说任何具体系统的稳定性在时间上是有限的。其次,任何具体系统的稳定性是与一定的变量及其一定变化范围有关的。任何具体系统只是在某些输入、干扰或环境影响下保持稳定,并不是在任一输入、干扰或环境影响下都保持稳定。因此,说稳定性是各种系统的基本性质之一,仅仅意味着从某种意义上看任何系统都是稳定的,而不是指各种系统在任何意义下都是稳定的。

我们还可以从系统与变换的对应关系上考察系统的稳定性。一个系统如果具有封闭变换,它就是稳定的。例如,如果系统 S 在状态 a 中保持不变,亦即系统的变换 T_1 使状态 a 向自身过渡,那么状

态 a 就是稳定的。即使系统 S 一时离开状态 a 而进入其他状态,但最终还是返回到状态 a 。这种情况可记为:

$$\begin{aligned} T_1 & \begin{cases} a, b, c, d \\ a, c, a, b \end{cases} \\ \alpha: T_1(a) &= a \\ \beta: d-b-c-a-a-\dots \end{aligned}$$

系统具有单一稳定状态的情形是一个特殊的例子。更普遍的情形是,系统在它的封闭变换中维持在一定的稳定领域。例如,

$$\begin{aligned} T_2 & \begin{cases} a, b, c, d \\ b, c, d, a \end{cases} \\ m(a, b, c, d) \end{aligned}$$

这时,各个状态的集合 m 构成系统的稳定领域。

在系统研究中,我们不仅研究系统某一状态的稳定性问题,而且研究整个状态序列的稳定性问题。一般来讲,后者比前者更重要。如果我们用相空间讨论系统的稳定性,那么我们用相空间中的一个相点表示系统的一个状态,用相轨道表示系统的状态序列,然后讨论相点及相轨道的稳定性问题。这在系统进化研究中尤为重要。

根据对系统稳定性的上述理解,我们从三个方面讨论系统的稳定性,那就是李亚普诺夫(Lyapunov)稳定性、输入—输出稳定性以及所谓“结构稳定性”。

5.2.2 李亚普诺夫稳定性

一、李亚普诺夫稳定性定义

李亚普诺夫稳定性理论所研究的是系统初始条件的变化对系统特性的影响。设定系统的一个参考状态 X_s ,就可将系统的状态写成

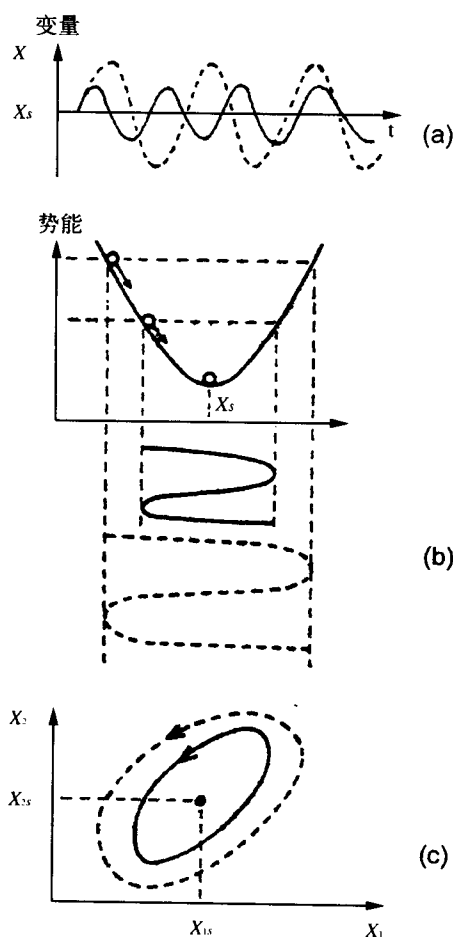


图 5—5 李亚普诺夫意义下的稳定

如果随着时间趋于无穷大,扰动 $x(t)$ 衰减为零, $X(t)$ 最终回到 X_s , 则称 X_s 是在李亚普诺夫意义下渐近稳定的, 如图 5—6 所示。图中, (a) 表示 $X(t)$ 最终回到 X_s ; (b) 表示该系统的相轨道收敛于一个相点。

$$X(t) = X_s + x(t) \quad (5.2)$$

其中 $x(t)$ 为扰动。可以区分下列三种情形。

1. 李亚普诺夫意义下的稳定

对于所有大于某个初始时间 t_0 的时间, 状态 $X(t)$ 保持在参考状态 X_s 的某邻域内, 则称 X_s 是在李亚普诺夫意义下稳定的。图 5—5 可表示其含义。图中

- (b) (a) 表示围绕 X_s 的扰动对于任何时间都是有界的; (b) 为与之对应的力学模型, 表示两种不同初始条件下的质点在势阱中的运动; (c) 表示与参考状态 (X_{1s}, X_{2s}) 的两种不同扰动相对应的相空间轨道。

2. 李亚普诺夫意义下的渐近稳定

3. 李亚普诺夫意义下的不稳定

如果随着时间推移, 状态 $X(t)$ 不再保持在 X_s 的邻域内, 则称 X_s 是在李亚普诺夫意义下不稳定的。如在图 5—6(a) 中, 如果系统

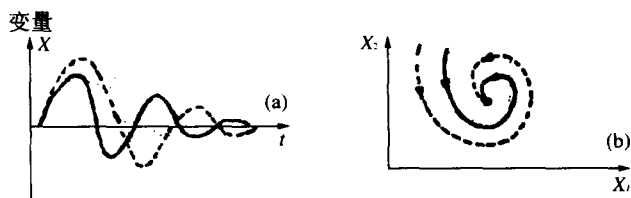
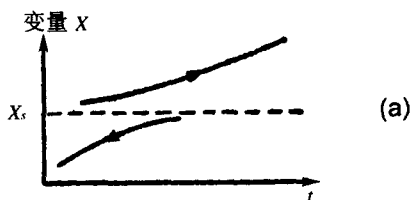


图 5—6 李亚普诺夫意义下的渐近稳定

状态的变化方向不是由左至右, 而是由右向左, 或在 (b) 中, 相轨道的变化方向不是由外向里, 而是由里向外, 就表明不稳定性。



又如如图 5—7 中, 亦可看到不稳定性。其中, (a) 表示 $X(t)$ 日益远离 X_s ; (b) 为其力学模型, 表示初始位置在凸部顶点的质点越来越远离其初始位置; (c) 表示与之对应的相轨道。

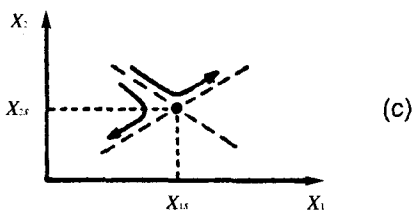
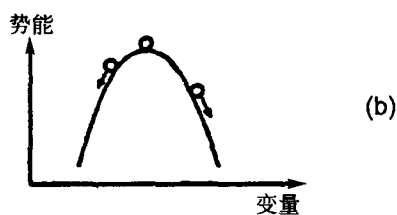


图 5—7 李亚普诺夫意义下的不稳定

还可以用图 5—8 来解释以上的三种情况。这里是用此图说明一个用二阶常微分方程刻画的系统的稳定性。对于以任意给定的正数 ϵ 为半径所作的圆 $s(\epsilon)$, 如果总能找到一个以适当的 $\eta > 0$ 为半径的圆 $s(\eta)$, 当

时间 t 无限增大时,从圆 $s(\eta)$ 内出发的用以表示系统响应的轨道总保持在圆 $s(\epsilon)$ 内,则这个系统是在李亚普诺夫意义下稳定的。当由圆 $s(\eta)$ 出发的轨道总在圆 $s(\epsilon)$ 内,并且收敛于原点 $x(0)$,则这个系统是李亚普诺夫意义下渐近稳定的。如果不论 $s(\eta)$ 的半径多小,由 $s(\eta)$ 出发的轨道总能越出圆 $s(\epsilon)$ 外,则这个系统是李亚普诺夫意义下不稳定的。可知,域 $s(\epsilon)$ 表示系统响应的边界。李亚普诺夫就是根据系统响应是否有界来区分上述三种情况的。

根据以上的讨论,可以给出对李亚普诺夫稳定性的确切定义。考虑系统状态方程

$$\begin{aligned}\dot{X} &= f(X, t) \\ f(0, t) &= 0, \text{对任一 } t\end{aligned}\quad (5.3)$$

这意味着 0 是一个平衡点,即曲线 $X(t) = 0$ 是系统的一条轨道。我们可以从初始值的小扰动与这条轨道变化的关系中考察系统的稳定性。

1) 李亚普诺夫意义下的稳定

$\forall t_0, \forall \epsilon, \exists \eta$, 使得

$$\|X(t_0)\| < \eta \Rightarrow \|X(t)\| < \epsilon, \text{对于 } t > t_0 \quad (5.4)$$

则称系统式(5.3)是在李亚普诺夫意义下稳定的。换言之,一个系统是李亚普诺夫意义下稳定的,当且仅当初始值的小扰动导致轨道的小扰动,见图 5—9(a)。这里符号 $\| \cdot \|$ 为范数^①。

① 符号 $\| \cdot \|$ 表示范数。一般,设 X 为 $\mathbf{R}$ (或 $\mathbf{C}$) 上的向量空间。当存在从 X 到 $\mathbf{R}$ 的函数 $\| \cdot \|$, 对于所有的 $x, y \in X, a \in \mathbf{R}$ (或 $\mathbf{C}$), 满足

(1) $\|x\| \geq 0$; 若 $\|x\| = 0$, 则 $x = 0$;

(2) $\|ax\| = |a| \|x\|$;

(3) $\|x + ty\| \leq \|x\| + t\|y\|$,

则称 X 为赋范空间, 称 $\| \cdot \|$ 为 X 上的范数。在赋范空间 X 中, 对任意两点 $x, y \in X$, 可定义距离为 $\|x - y\|$ 。

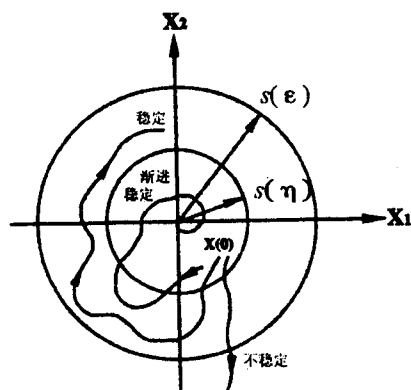


图 5—8 二阶系统稳定性

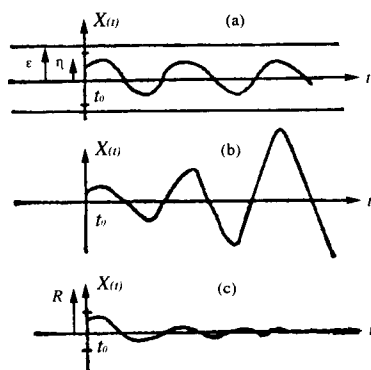


图 5—9 李亚普诺夫意义下的稳定性

2) 李亚普诺夫意义下的不稳定

如果不存在满足式(5.4)的 η , 则称该系统是在李亚普诺夫意义下不稳定的, 即是在 $t = 0$ 的区域内所有的轨道接近于 $X(t) = 0$, 但在 $t \rightarrow \infty$ 时则不再保持这种接近状态, 见图 5—9(b)。

3) 李亚普诺夫意义下的渐近稳定

如果

(1) 系统是李亚普诺夫意义下稳定的;

(2) $\exists R$, 使得

$$\|X(t_0)\| < R \Rightarrow \|X(t)\| \rightarrow 0, \text{ 当 } t \rightarrow \infty \quad (5.5)$$

则称该系统是李亚普诺夫意义下渐近稳定的。这意味着, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 系统的轨道渐近地回复到初始轨道(这里是 $X(t) = 0$), 如图 5—9(c)所示。

二、李亚普诺夫稳定性判别方法

从上述定义可知, 如能对于系统的初始条件求解系统的状态方程, 就能根据解的性质去判断系统稳定与否。对于线性系统, 一般可以求解其状态方程。对于非线性系统, 尚无求解其方程的一般方法。

但是无论对线性系统还是对非线性系统,人们把稳定性的重要研究方向放在探索不求解方程就能判定一个给定解是否稳定的方法。对于线性系统,问题早已得到了解决。对于非线性系统而言,有李亚普诺夫第一方法和第二方法。

第一方法:亦称间接法。用近似级数表示非线性函数,然后用近似方法求解非线性方程,再由收敛性定理导出有关稳定性的结论。这一方法已解决了弱非线性系统的稳定性问题。

第二方法:亦称直接法。引入一个被称为李亚普诺夫函数的纯量函数,记为 $V = V(t; x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。它是实变数 $t, x_1, x_2, \dots, x_n$ 的实函数,它与状态方程式(5.3)的联系表现于

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} \quad (5.6)$$

其中 $x_i(t)$ 为 X 的组分变量。方程式(5.3)的解记为 $x_i(t)$, 则该方程的稳定性问题就可视为 $x_i(t)$ 的稳定性问题。这里有三个基本定理:

如果对于方程 $\frac{dx}{dt} = f(x, t)$ 找到一个定号函数 $V(x, t)$, 那么

- (1) 当 $V \frac{dV}{dt} \leq 0$ 时, $x_i(t)$ 稳定;
- (2) 当 V 有无限小上界, 且 $V \frac{dV}{dt} < 0$ 时, $x_i(t)$ 渐近稳定;
- (3) 当 $V \frac{dV}{dt} > 0$, $x_i(t)$ 不稳定。

在实际问题中,只要找出一个系统状态方程的李亚普诺夫函数,就能根据上述定理来判定系统在李亚普诺夫意义下的稳定性。但是对大量系统来说,寻找李亚普诺夫函数又是一个难题。虽然人们为寻找某些类型系统的李亚普诺夫函数提出各种方法并获得了成功,但是到目前为止还没有寻找李亚普诺夫函数的通用方法与步骤,能够找到李亚普诺夫函数的只是少数特例。

5.2.3 输入—输出稳定性

一、输入—输出稳定性定义

这里所要讨论的是输入的变化对输出的影响。如果对输入的小扰动仅产生输出与目标值的小偏差,就称这个系统是输入—输出稳定的;如果输入的小变化引起输出与目标值的大偏差,就称这个系统是输入—输出不稳定的。下面,以外部描述给出的动态系统

$$\begin{aligned} y(t) &= f(u, t) \\ 0 &= f(0, t) \end{aligned} \quad (5.7)$$

为例,讨论系统的输入—输出稳定性。这里考虑输入 $u(t)$ 与输出 $y(t)$ 是有界的情况。

如果 $\forall t_0, \forall \epsilon, \exists \eta$, 使得

$$\|u(t)\| < \eta \Rightarrow \|y(t)\| < \epsilon, \text{ 对于 } t > t_0 \quad (5.8)$$

则称系统式(5.7)是有界输入—有界输出稳定的(通常记为 BIBO 稳定的)。如果不存在满足上述关系的 η , 则称该系统不是 BIBO 稳定的。

如果在图 5—9 中,将 X 改为目标值 J 与输出 $y(t)$ 的偏差 $u(t)$, 那么这张图可用来说明负反馈系统的输入—输出稳定性。将图 5—9 改为输入—输出关系图后,分别以 a', b', c' 取代原图中的 a, b, c 。在 (a') 中,输出值围绕目标值等幅振荡,但两者的偏差是有界的,这是个稳定的情况,相当于所谓稳定型负反馈的情况,见第四章 4.3.2。在 (b') 中,输出值振荡地增大,输出值与目标值的偏差也振荡地增大,这是个不稳定的情况,相当于所谓发散型负反馈的情况。在 (c') 中,输出值与目标值的偏差振荡地衰减,最终趋于零,这是渐近稳定的情况,相当于所谓收敛型负反馈的情况。

为了避免产生误解与混乱;这里有必要说明用词不一致的问题。在不少论著中,人们把上述的 (c') 看作是稳定的,把 (a') 与 (b') 都看

作是不稳定的,或者把(b')看作是不稳定的,把(a')看作是临界稳定的。把(b')看作是不稳定的这一点上,用词上没有不统一的地方。但是在这里的解释中(a')被说成是稳定的。实际上,由于环境影响和系统本身的性能上的原因,实际系统的输出值很难完全达到目标值(即(c')的情形),也就是说输出值与目标值之间总有某种偏差。因此,对实际系统来说,只要其输出幅值足够小,就可以把(a')看作是稳定的,而幅值大小就被看作是稳态误差。上面给出的关于系统 BIBO 稳定的定义已经包含了这些含义。

二、BIBO 稳定性判别方法

如果系统式(5.7)是由单位反馈控制的系统,见图4—7,则它的传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (5.9)$$

该系统的特征方程为

$$1 + G(s) = 0 \quad (5.10)$$

现已知道,系统稳定的充要条件是特征方程的根都有负实部。为判断这一点,已研究出一些判据。例如,劳斯(Edward John Routh, 1831—1907)判据是根据特征方程的系数来判断一个线性定常系统是否稳定;奈奎斯特(Harry Nyquist, 1889—1976)判据是用有理传递函数或非有理传递函数的图解法来判断一个线性定常系统是否稳定。关于这些判据的详细说明,请阅有关文献。

5.2.4 结构稳定性

一、结构稳定性

考虑一个其状态通常是光滑的,但有时或在有些地方也出现不连续性的系统。假定它有 n 个状态变量 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 m 个控制变量 $(u_1, u_2, \dots, u_m)$ 。那么,系统在任何时刻的值都可完全由 x 的值

来决定,而 x 的值由 u 来决定。状态变量又可称为内部变量,控制变量又可称为外部变量。

在上述假定下,用来描述系统状态的相空间是 $(n+m)$ 维欧几里得空间,系统状态由这一相空间中的各点来代表。设系统有势函数 $V(x)$,以图 5—10 所示的系统为例,可定义下列概念。

平衡曲面 M :表示 V 的全部临界点的集合,亦即系统的全部平衡点的集合。在右图中,平衡曲面是三维曲面。

控制空间 C :表示由所有的控制变量构成的空间。在右图中,控制变量为 u 与 v ,控制空间为二维空间即平面,是平衡曲面的投影。

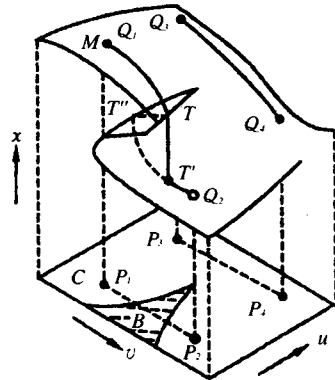


图 5—10 尖顶型突变的图像

控制点 P :由控制变量的坐标确定。这里,每个控制点都由 u 与 v 的值来确定。

分叉点集 B :表示 M 中的折痕在 C 上的投影,是在 C 上使 V 的形式发生突变的所有控制点的集合。

不难看出,表示系统状态的每个相点必定总是位于 M 上,而相点的位置取决于 P 在 C 上的位置。当控制变量发生变化时, P 的位置就发生变化, P 所走出的路径被称为控制轨迹。当 P 在 C 上移动时,与 P 相对应的相点就在 P 的控制下在 M 上移动,画出与控制轨迹对应的相点轨迹即相轨道。图中可知, P 的平稳变化总是引起 x 的平稳变化,仅有的例外是当控制轨迹越过 B 时出现的。在与 B 对应的 M 的折痕边缘上,相点的移动发生突跳,从上叶突跳到下叶,或从下叶突跳到上叶,不经过折痕中的各点。例如,当控制轨迹为 P_1P_2 时,相点轨迹不是 $Q_1TT''T'Q_2$,而是 $Q_1TT'Q_2$,即是说当 Q_1 平

稳地移到 T 后,不是继续平稳地移到 T' ,再到 T' ,而是从 T 直接跳到 T' 。当控制轨迹为 P_2P_1 时,相点轨迹也不是 $Q_2T'T'Q_1$,而是从 Q_2 平稳地移到 T'' 后,直接从 T'' 突跳到平衡曲面的上叶。但是,当控制点由 P_3 移到 P_4 ,或者从 P_4 移到 P_3 时,对应的相点或者从 Q_3 平稳地移到 Q_4 ,或者从 Q_4 平稳地移到 Q_3 。相点在 M 上的运动是否碰到奇点,取决于 u 与 v 的相对数值。

通过上述的说明,我们可以定义所谓结构稳定性。如果系统控制变量的小变化不引起系统状态的大变化,就称系统是结构稳定的;如果控制变量的小变化导致系统状态的大变化,就称系统不是结构稳定的,这时就要发生分叉现象。换言之,在控制变量发生小的变化时,如果相轨道也只发生小变化,就称系统是结构稳定的,而如果相轨道发生大变化,就称系统不是结构稳定的。系统的这种性质称为结构稳定性。

结构稳定性概念还可以用其他方式来给出定义。例如,考虑一个含有 m 个参数的函数族。如果这些参数连续变化,可视之为 m 维空间中的坐标,于是每个函数都可以用这个空间中的一个点来表示。如果 P 点的函数为 f_P ,与 P 点足够靠近的任一点 Q 的函数为 f_Q ,那么当 f_Q 和 f_P 有相同的形式时,就称 f_P 为这个函数族的一个结构稳定函数或生成函数。所有其相应函数为生成函数的 P 点的集合称为生成点的子集,而所有使 f_P 非生成的 P 的集合称为分叉点集。

科学研究和日常生活中的很多平凡事实有助于理解结构稳定性概念。例如,在科学研究中,我们通常强调验证科学规律的实验在操作上的可重复性。在相同的实验条件下得出相同的实验结果,被视为科学规律的存在理由。但是,如果细致考察每一次实验,就不难发现,实验条件的绝对精确的复制是绝对不可能的,而实验结果的完全精确的重复也是绝对不可能的。因此,我们通常只是满足于在近似

相同的实验条件下得到近似相同的实验结果。这时,实验结果就被看作是“结构稳定的”。又如,图 5—11 表示两种不同的鱼,即刺鲀和翻车鱼。通过一种简单的网络变换,可使这两种鱼互相转变。一种鱼上的各点与另一种鱼的各点之间存在一一对应的关系。一种鱼的一个鳍变形为另一种鱼的一个鳍,一种鱼的一只眼睛变形为另一种鱼的一只眼睛。在这种变换中,并没有出现新的定性特征,如长出一个新鳍。因此,从数学上看,这

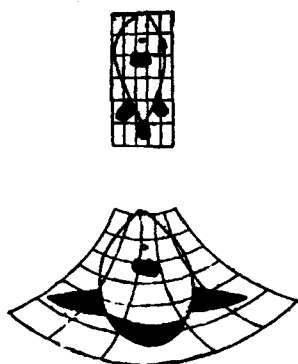


图 5—11 刺鲀(上)与
翻车鱼的相互转换

两种鱼是相同的。再如,在某种意义上,结构稳定性概念可视为不同字体和书法艺术的基础。在不同的字体中,一个字的形式变得多种多样,而在书法家的笔尖下字形更是变化多端。但是,我们还是能认出它们。

二、结构稳定性与突变

下面,我们再举一些例子来说明结构稳定性和突变。

1. 齐曼突变机构^①

图 5—10 可用来解释许多现象,其中包括气液相变、狗在愤怒和恐惧时的反应以及一些非线性振荡器。该模型被称为尖顶型突变模型,是因为其分叉点集的几何形状呈尖顶型,形如艾菲尔铁塔。这一模型还可用来表示齐曼(Erik Christopher Zeeman, 1925—)设计的一种突变机构。

这一机构是很简单的,如图 5—12。准备一块木板(A)和一个用卡纸剪成的圆盘(B),然后用图钉(C)穿过圆盘中心把圆盘装在木板上,使

^① Arnold V I. *Catastrophe Theory*. New York: Springer-Verlag, 1986. 10—13.

之能自由转动。把另一个图钉(D)钉在接近圆盘周边的D点上,但要使钉尖朝上。第三个图钉(E)要钉在木板上。再准备两根橡皮筋(F、G)、一支铅笔(H)和一张白纸(I),用橡皮筋把E、D和H连接起来。

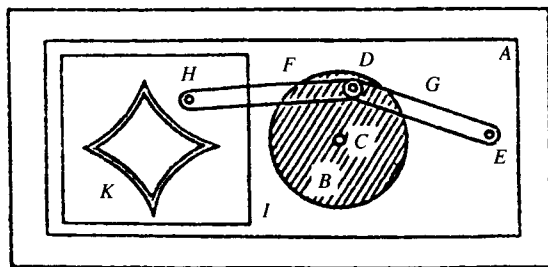


图 5—12 齐曼突变机构

机构做成之后,我们用铅笔在白纸上画线。一开始,圆盘位于某个位置上。当我们移动铅笔时,圆盘可转动。当铅笔移到某个位置时,就可以发现铅笔的位置稍有变化即可导致圆盘位置的突变。如我们把所有这些“突变位置”都标记在白纸上,就可得到钻石形的“突变曲线”(K),它有四个尖顶。当铅笔越过突变曲线时,有时发生突跳,有时却不发生突跳。如果我们使铅笔垂直于机构的对称轴越过突变曲线作前后移动,则在两个方向上都只有一次突跳,而且发生突跳的位置不一样。如果铅笔在突变曲线之外,则圆盘只有一个平衡位置;如果铅笔在突变曲线之内,则圆盘有两个稳定平衡位置,其一是D向左边倾斜,另一是D向右边倾斜;如果我们仔细操作,还可以在两个平衡位置之间找到第三个平衡位置,但它是不稳定的。

显然,齐曼突变机构的状态由三个坐标决定。其中,笔尖的位置由两个坐标决定,圆盘的位置由一个坐标(即旋转角,CD与对称轴之间的夹角)决定。前者为控制变量,后者为状态变量。如果给定这三个,则橡皮筋的拉伸程度和整个机构的势能就被确定。圆盘要转动到势能(至少是局部地)最小的状态。就铅笔的一个固定点而言,势能是

圆盘位置的函数。对应于控制变量的不同值,势能函数可取一个或若干个极小值,见图 5—13 中 a。当控制变量变化时,如果极小值的位置光滑地变化,则不发生突跳。当控制变量的变化达到使极小值和极大值同时消失时,就发生突跳,见图 5—13 中 b。突跳之后,圆盘又位于与另一个局部极小值相对应的位置上,见图 5—13 中 c。

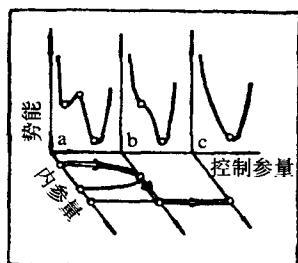


图 5—13 突变机制示意图

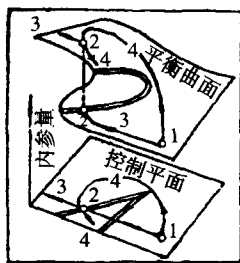


图 5—14 突变与渐变

我们来考察这个机构的三维状态空间。圆盘处于平衡的那些状态形成一个光滑曲面。我们把这个曲面沿着状态变量投影到控制平面上,见图 5—14。所有折叠点的投影正是突变曲线。该图清楚地表明,当控制变量越过突变曲线时,为什么有时发生突跳,有时却不发生突跳。

对其他许多突变现象的研究实际上类似于以上的考虑。不过,状态变量和控制变量的数目会有区别。由平衡状态形成平衡曲面,而平衡曲面在控制空间上的投影可能有奇点。那么,当控制变量发生变化时,在这些奇点上,一个平衡态就突跳到另一个平衡态。

2. 天才与疯子^①

这也是齐曼构想的例子,见图 5—15。为了描述创造性活动可考虑三个变量,即技能(T)、灵感(E)和成就(A)。这样,可构造一个

^① Arnold V I. *Catastrophe Theory*. New York: Springer-Verlag, 1986. 7—9

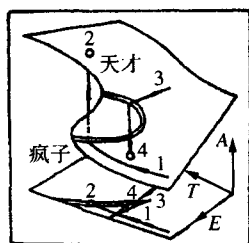


图 5—15 天才与疯子

三维空间,其坐标为 (T, E, A) 。把表示成就变化的曲面沿着 A 轴投影到平面 (T, E) 上。对一个一般曲面来说,奇点是折叠和尖顶。图 5—15 所示的尖顶型可解释科学家的成就怎样依赖于他的技能与灵感。

如果灵感不多,那么他的成就就单调而相当缓慢地随技能的增长而增长。如果灵感很多,那么会出现很不一样的现象。随着技能增长,成就就会以跳跃方式增多。例如,当灵感和技能按曲线 1 变化时,在点 2 上就发生这种跳跃。这里我们看到的是“天才”。另一方面,如果灵感的增加不以相应的技能增长为基础,也会发生“突变”,如在曲线 3 上的点 4 所看到的那样,成就以突跳方式减少。这里我们看到的是“疯子”。

富有启示的是,从“天才”状态到“疯子”状态的跳跃或由“疯子”状态到“天才”状态的跳跃是沿着不同路线进行的,结果,对于足够多的灵感来说,一个天才和一个疯子可能具有同样多的灵感和同样水平的技能,惟一不同的只是他们的成就(和先前的历史)。

3. 谐振子与范德波尔 (*Bathasar van der Pol*, 1889—1959) 振子^①

这里举物理学上的例子。设一个振子的位置为 x ,速度为 v ,当

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad \frac{dv}{dt} = -\alpha^2 x \quad (5.15)$$

时,这个振子就是谐振子。谐振子的状态画出相空间 (x, v) 上的椭圆轨道。如果上面第二式的右边加上摄动 β_μ ($\beta > 0$),那么振幅就按指数函数增大,这个椭圆轨道发生大变化,变成发散的。即是说,谐

① 桑德斯 P T. 灾变理论入门. 上海:上海科技文献出版社,1983

振子不是结构稳定的。

与此不同,范德波尔振子是结构稳定的。这是一种自激振荡电路,其方程为

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mu(x^2 - 1)\frac{dx}{dt} + x = 0, \quad \mu > 0 \quad (5.16)$$

阻尼项 $\mu(x^2 - 1)dx/dt$ 的非线性取决于回路所用元件的特性。当振幅 $|x| < 1$ 时, $\mu(x^2 - 1) < 0$, 阻尼为负, 原点为一个不稳定平衡点, 振幅趋于增大。但是振幅不可能像负阻尼线性振荡器那样无限地增大, 因为当 $|x| > 1$ 时, $\mu(x^2 - 1) > 0$, 即阻尼变成正的。所以, 无论初始振幅多大或多小, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 从相平面 $(x, \dot{x})$ 上的任何一点 (除作为奇点原点外) 出发的相轨道最终都以螺线形式渐近到一个稳定极限环, 如图 5—16(a) 所示。图中 (b) 所示的是当 μ 很大时所形成的极限环形状。

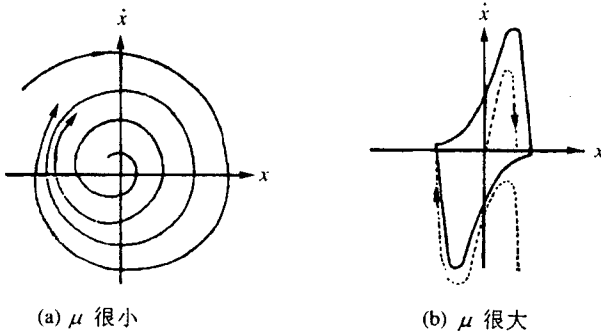


图 5—16 范德波尔方程的相平面图

5.3 等级性

5.3.1 等级性

自从贝塔朗菲的一般系统理论问世以来, 系统的等级性一直受

到许多系统研究者的广泛重视。贝塔朗菲曾经认为：“等级秩序的一般理论显然将是一般系统理论的主要支柱。”^①在系统科学中甚至有一个分支，被称为“等级系统理论”。但是，我并不想给等级性以压倒其他基本系统性质的地位，只是把它当作系统的基本性质之一。

“等级”一词在这里是英文 hierarchy 的译词。这个英文词来自希腊语 hieros(神的)和 archos(统治)，通常表示“教级”、“僧侣统治”之义。在系统学中，这个英文词被用来表示系统的等级性。在中文中它还有其他的各种译法，如“层次性”、“递阶性”等。

所谓等级性，是指系统的每一组元又可以被视作一个系统，而所研究的系统本身又是由它和其他系统构成的更大系统的组元。系统等级性的根据在于：系统是结构与功能的统一体，结构是诸要素的分布关系的总体，而功能是诸要素活动关系的总体。结构与要素之间存在着相对独立性，因而结构具有等级性；功能与要素活动之间存在着相对独立性，因而功能具有等级性；结果，结构等级与功能等级辩证地统一成为系统等级。

我们在 3.3.1 中已经谈到：一个系统的下层系统分为两类，一是子系统，另一是分系统。因此，系统的内部等级序列既可以从其子系统等级序列上进行研究，也可以从其分系统等级序列上进行研究。如果用子系统概念研究系统的等级性，就可以得到向下的等级序列：

系统→第 1 级子系统→第 2 级子系统→……→第 n 级子系统→要素。

另一方面，我们所研究的系统又可以与其他系统相结合而构成更大的系统。这时，也是为了避免语言上的混乱，我们引进“超系统”概念，说这一系统是我们所研究的系统的超系统。超系统也可能有

① Bertalanffy L. v. *General System Theory*. 1968. 27—28

多个等级。但在每个具体问题中都会达到在我们所考虑的问题范围内不能或不必再与其他系统结合而构成更大系统的超系统,我们就称之为“总系统”。这样,就可以得到向上的等级序列:

系统→第 1 级超系统→第 2 级超系统→……→第 m 级超系统→总系统。

如果把向下的等级序列和向上的等级序列综合成一个统一的系统等级序列,就可以得到系统等级序列的总模式:

要素→子系统(有 n 个等级)→系统→超系统(有 m 个等级)→总系统。

在实际研究工作中,影响系统等级划分的因素有三个,即系统特性、研究目的和研究条件。首先,不同的具体系统具有不同的系统特性,因而有不同的系统等级。例如,细胞的系统等级与原子的系统等级不同,国家的系统等级与家庭的系统等级不同。其次,即使是同样一个系统,由于研究者的研究目的(和需要)不同而可能要分成不同的系统等级。例如,社会学家可以不考虑人体内部结构等级,但对于医生来说对人体内部结构的研究是必不可少的;一个服装设计师不用考虑衣料的原子结构,但是一个基本粒子物理学家则要研究原子及其组元的结构。第三,系统等级的划分还受着各种研究条件的制约。研究者的知识水平、所使用的仪器设备及其他实验条件等都影响着对系统等级的划分。例如,在 19 世纪人们曾经认为原子是不可分割的,但是在 20 世纪云室的发明使人们可以观测到电子、正电子、 μ 粒子及其他微观粒子的径迹。

因此,在具体系统研究中可能出现 $n=0$ 或 $m=0$ 的情况。在 $n=0$ 时,系统被看作是直接由它的各基本单元组成的整体;而在 $m=0$ 并且不用考虑其总系统的情况下我们可以直接考虑系统与环境的联系。但是无论何种情况,都并不否定系统的等级性。

5.3.2 若干实例

根据上述的系统等级性概念及系统等级划分的一般理论,我们

来考察若干具体系统的等级序列。

一、宇宙等级

面对五彩缤纷的自然界,我们不能把各种各样的系统看作同一等级上的存在物,首先应该将各种物质形态放到宇宙等级序列中去。整个宇宙的等级序列如图 5—17 所示。

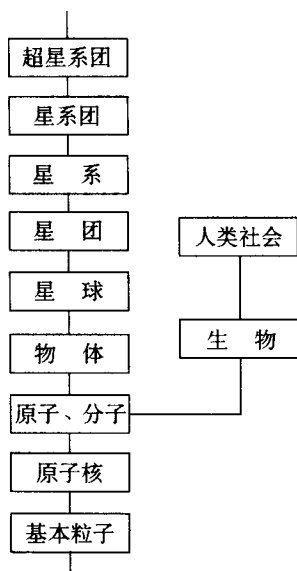


图 5—17 宇宙等级

值得注意的是,宇宙等级序列的最上层和最下层都不是封闭的,也就是说它既无上限,亦无下限。宇宙是无限的。我们既不能把整个宇宙看作是目目前所知道的超银河系,也不能把已知的基本粒子看作是构成宇宙的最小单元。

宇宙的等级性不会因发现上述各层次之间的中间环节而改变。正如恩格斯所说:“这些中间环节只是证明:自然界中没有飞跃,正是因为自然界自身完全由飞跃所组成。”^①我们不仅要把握各层次之间的区别,而且要把握各层次之间的相互渗透;要把自然界看作是连续性与不连续性的统一。

二、人类生命等级

在本书第三章,我们已看到米勒的生命系统层次一分系统表,他把生命系统分成八个层次。这里所要介绍的是密尔森(John H. Milsum)的人类生命等级序列模型。他把全人类看作一个系统,人的细胞看作人体的基本生命单元,从而把人类生命等级分成 11 个层

① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 248

次,如图 5—18 所示。图中,右面的数字表示各层次的系统所含细胞的数量级。例如,成人体内的细胞数为 10^{14} 个数量级。左面的若干斜线表示每个系统层次上有多个子系统。

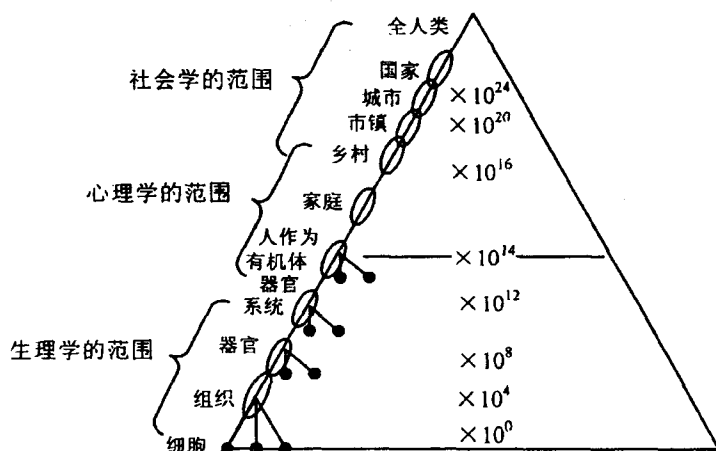


图 5—18 人类生命层次金字塔

Klir G(ed). *Trends in General Systems Theory*, 148

三、社会等级

社会等级的研究可以从两方面进行。其一是从社会系统历史发展中研究从低级社会到高级社会的时间序列,其二是研究各个社会内部的等级序列。第一个问题我们将在第七章讨论,这里只讨论各社会内部的等级序列。

1. 原始共产制社会内部的等级性

原始共产制社会没有阶级分化,没有私有财产。但是,它也不是人人平等的社会。母权制或父权制本身所反映的不只是女性或男性在人类自身的生产中的地位,而且是他们在生活资料和生产资料生产中的地位,因而是他们在整个社会等级中的地位。母权制的被推翻和父权制的确立,对女性来说是一次历史性的失败,而对男性来说是一

次历史性的胜利。这一具有历史意义的转变,如像其他几乎所有的社会革命一样,应该被认为是充满着痛苦、冲突甚至是暴力的历史过程。

2. 奴隶制社会内部的等级性

奴隶制社会是人类历史上第一个用国家来维护社会等级秩序的社会。我们从柏拉图的“理想国”里可以了解当时的社会等级序列。他把人的灵魂分为三个部分即理性、意志和情欲。这三者有自然的统属关系,理性最高,意志其次,情欲最下。与此对应,人分为三个等级,即统治阶级、武士阶级和劳动者阶级。他宣称神用不同的金属造出了这三个等级。用金子造的是统治者,用银子造的是武士,而农夫和手艺人是用铜与铁造出来的。至于奴隶,根本就不能算人,连破铜烂铁都不如。奴隶的这种社会地位亦可在公元前一世纪罗马时代的瓦龙(Marcus Terentius Varro, 前 116—27)那里更清楚地了解。他把工具分为三种,即哑工具(如车辆)、发叫声的工具(如牲畜)和会说话的工具(即奴隶)。支撑整个奴隶制社会的主要是奴隶的劳动,但他们却不被当作人。这说明那是一个最野蛮的社会。从某种意义上说,角斗场上奴隶之间的厮杀乃是奴隶主与奴隶之间殊死争斗的折射。因此,角斗奴隶们的造反就成为加速罗马帝国灭亡的强大动因。

3. 封建社会内部的等级性

封建社会也是一个等级森严的社会。除了封建社会基本等级秩序中封建地主阶级和农民阶级的等级区别以外,封建统治阶级内部的社会等级也非常严格。例如,中国封建社会的品级生动地表现出官吏的职官等级。在魏、晋时,始设品级,从第一品到第九品,共分九等。北魏时每品各分正、从,第四品起正、从品又各分上、下阶,共为三十等。唐、宋时文职与北魏相同,武职自三品起即分上、下。隋、元、明、清只分正、从品,不分上、下阶,共为十八等。

与此相似,法国 18 世纪资产阶级革命之前将国民分为三个社会等级,第一等级为僧侣,第二等级为贵族,第三等级包括农民、小商

人、手工业者、城市平民和资产阶级。

4. 现代社会内部的等级性

在社会发展的现阶段,存在着各种各样的社会模式。从社会制度上看有资本主义制度、社会主义制度和(一定意义上的)封建制度。从政体上看有君主制、君主立宪制、民主共和制和人民代表大会制等。从经济发展水平上看有发达国家和发展中国家等。但不管怎样分划,每个国家内部都存在着社会成员依其社会地位而形成的社会等级序列。即使在最民主的资本主义国家里,资本家阶级和工人阶级的对立依然存在,实现普遍的社会平等困难重重而实不可能。在社会主义国家,社会成员之间存在经济地位、政治地位以及其他社会地位上的差异也是客观事实,而这些差异正是形成不同社会等级的客观基础。

从上可知,社会的发展,尤其是各种形式的社会革命,不断改变社会成员在社会等级序列中的地位,但是从未消除也不可能消除社会等级本身。任何社会都有其特定的社会等级序列。某种社会等级序列的维持不仅是与之相适应的社会赖以存在和保持稳定的必要条件,而且是一个稳定社会的基本标志之一。从这个意义上,我们可以说,任何社会变革的任务在于推翻旧的社会等级序列,建立新的社会等级序列。

四、管理等级

在人类系统的群体(在米勒所使用的意义上)以上的各层次上不可避免地存在着管理问题。例如,家庭、医院、城市、国家等都有如何管理的问题。上面所说的社会等级当然包含着这种管理等级。管理等级的划分可根据系统内部成员的管理权限的大小而进行。就复杂的管理系统而言,就设有各层次的管理机构,其中包括决策委

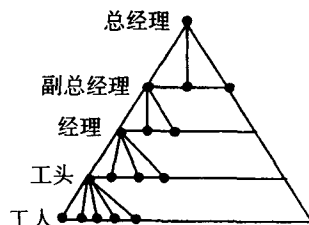


图 5-19 企业管理等级

员会(或称管理委员会)和各种具体工作人员。图 5—19 所示的是密尔森勾画的企业管理等级模型。实际上,对于较大的群体和群体以上层次的大量系统可勾画出与此大致类似的管理等级模型。

根据帕金森(Cyril Northcote Parkinson, 1909—1993)对大量管理等级的研究,可知道下列几点:(1)管理等级的基本结构是一个金字塔式等级结构。不论在专制的奴隶制国家和封建制国家,还是在标榜民主的现代国家中,也不论在整个社会系统中,还是在某个企业、医院、学校或军队中,普遍存在的都是金字塔式等级结构。(2)在每个管理层次上,一个管理者所能有效管理的人员数目最多是 10 人左右,但每个管理者都喜欢增加自己的部属,结果各级管理委员会都有一个趋于人数增多的自然趋势;当超过 21 人时,就会变得毫无效能,从而设立新的中间管理层次。在中国各历史朝代官僚机构的自然膨胀中可观察到这种趋势和其结果。(3)管理机构人员(包括管理委员会成员和具体工作人员)数目的增加与实际工作量并没有直接关系,从而造成人浮于事^①。我们在现实生活中到处都可以看到这种趋势。

五、人的需要层次

马斯洛(Abraham Harold Maslow, 1908—1970)关于人的需要层次的理论曾风靡一时,至今在行为科学和管理科学领域仍起着重要作用。他认为人的需要是激发动机的起点,而人的需要是有层次的。他把人的需要分成下列五个层次,如图 5—20 所示。

第一层次为生理需要,包括维持生活和繁衍后代所必需的各种物质需要,如衣、食、住、行、性、医等。这是最基本最原始的需要,又是所有其他需要的基础。

第二层次为安全需要,不仅包括身心的实际安全,而且包括对生

① Parkinson C N. *Parkinson's Law*. Boston: Houghton Mifflin, 1957

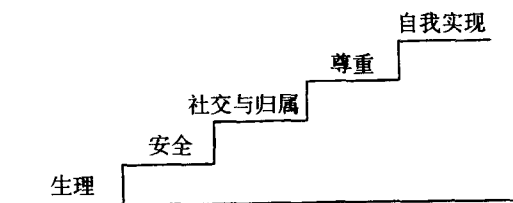


图 5—20 人的需要的层次

活条件的安全保障,例如对身体健康的要求,对职业稳定性的要求,对工作条件安全性的要求,以及对老年生活保障方面的要求等。

第三层次为社交与归属的需要。例如,同家属、朋友、同事、上司等保持良好关系,寻求友谊、爱情、和谐等,并希望成为某一团体的成员而得到一种归属感,等等。

第四层次为尊重的需要,包括自尊和来自他人的尊重。自尊的需要是指对获得信心、能力、本领、成就、独立和自由等的愿望,而来自他人的尊重则是指威望、承认、接受、关心、地位、名誉和赏识等。

第五层次为自我实现的需要。这是最高层次的需要,指一个人需要做对他最合适的工作,充分发挥自己的潜在能力,表现自己的情感、思想与才能,实现自己的理想与抱负,不断地创造和发展。

马斯洛认为,人们一般按照需要层次序列的先后次序来追求各项需要的满足。当较低层次的需要得到满足后,较高层次的需要就作为一种主要刺激发挥作用,形成相应的动机,产生相应的行为。

对人的各种需要划分层次,这显然是马斯洛的贡献。但是,各层次需要之转化为人的活动的动机与动力,并不是简单的机械的从低层次到高层次的过程。各层次需要之间的相互作用是普遍的。

尤其是自我实现的需要,不管它前面几个层次需要的满足程度如何,都有可能作为显现的或潜在的动机和动力支配着人的各种行为。并且,人总是作为社会的人而生存与生活,因此人的社会责任感和使命感也经常作为显现的或潜在的动机和动力,支配着人的各种行为。自我实现不能等同于利己主义,个人主义的自我实现也不能等同于利己主义的自我实现,但是个人的自我实现的需要只有与整个社会对社会成员的需要和社会本身的发展需要相吻合时,才能成为形成正确动机和产生正确行为的基础。无论个人还是社会,都应该努力阻止自我实现的需要和健全的个人主义陷入利己主义的泥潭之中。

六、食物链等级

在生态系中,捕食者与被捕食者的关系是错综复杂的,但是从食物中潜在的能量流的角度上看,食物链构成金字塔式营养等级,如图5—21所示。

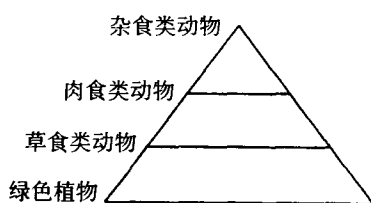


图5—21 营养等级

在这个营养等级中,最低层的是绿色植物,它们是生产者,它们把太阳能转变成化学能并贮藏起来。其他的生物都是消费者。这就告诉我们,包括人类在内的全部动物的惟一生存基础归根结底是植物,如同整个国民经济的

最终基础是种植业一样。因此,对一个国家来说,种植业的破产不是导致整个国民经济的破产,就是导致对外国的依附。

另一方面,由于食物网结构是金字塔式结构,越是低级的,个体数越多,越是高级的,个体数越少。在众多的动物物种中,杂食类动物为数极少。它们有非常强的生存能力,因为到处都有它们的食物。我们人类无疑是其中的佼佼者。人类的祖先从只吃植物转变

到既吃植物同时也吃肉即杂食,显然是向人类转变的进化过程中具有决定性意义的重要一步,而人类非凡的杂食能力是其他任何动物望尘莫及的。人类已有足够的能力,不仅能吃一切照其自然状态就可以吃的东西,而且把越来越多的就其自然状态而言几乎或根本不能吃的东西转变成自己的食物。这是一个进步。但是,由此导致的人口急剧膨胀正在摧毁食物网的金字塔式结构,从而正在摧毁人类自己生存的根基。人类似乎已经到了应该节制自己“食欲”的时候。

七、细胞内的控制等级

细胞是一种由基因、酶和激素构成的多级递阶控制内稳态系统,如图 5—22 所示。在细胞中,各种活性物质的生物合成受着酶的调

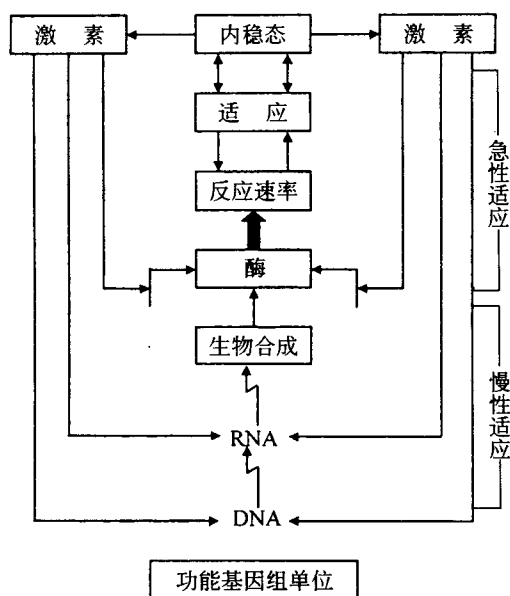


图 5—22 细胞内部控制等级

Klir G(ed). *Trends in General Systems Theory*, 151

节。由于细胞体内存在多种负反馈,各种活性物质可保持在一定水平上。DNA 是细胞内的主要控制器。一方面,在短期适应(急性适应)中,由内稳态负反馈控制器释放出来的激素控制酶的活动,以调节内稳态作用。另一方面,DNA 控制 RNA 合成, RNA 再来控制酶,而 DNA - RNA 阶段是由长期遗传适应过程(慢性适应过程)来控制的。

在前面的“人类生命等级”中,与这里的“长期适应”相对应的慢过程,是使不同类型的个人或社区适应于社会或被社会选择的“社会适应”,而激素对酶的快速控制则对应于依靠法律和管理措施的社会控制。

八、贝塔朗菲的系统等级模型

在系统研究领域,最早提出复杂性层次模型的是保尔丁。他于 1956 年把经验世界中的各种系统分成八个层次:(1)时钟机构,包括静态与动态物理系统;(2)恒温装置,或内稳态模型,用控制论机制处理信息;(3)细胞,生命的出现,具有自维持、自繁殖能力;(4)植物,开始出现基因型与表型的区别,并显示等终极性;(5)动物,其特征在于移动性、目的性行为与自我意识;(6)人,具有使用语言和符号的能力以及自我反射能力;(7)社会组织;(8)先验系统。

在保尔丁模型的基础上,贝塔朗菲提出了自己的系统等级模型,如表 5.1 所示。如同贝塔朗菲自己所说过的那样,这张表的内容有直观性质,逻辑上并不严密。但是这张表确实给人以许多启示。例如,从此表可知,高层次系统一般以低层次系统为前提,但是各层次都有其特殊性质。在这个意义上,从此表可了解还原论的局限性和实际知识中的欠缺部分以及系统观点的必要性。

九、系统等级性的数学描述

用数学语言来描述系统等级性的工作已由不少人做过。其中最多的是用集合论的方法定义系统,再描述系统的等级性。这里介绍

表 5.1 系统等级中的主要层次

层 次	说明与实例	理论与模型
静态结构	原子,分子,晶体,从电子显微镜水平到宏观水平的生物结构	例如:化学结构式,结晶学,解剖图谱
时钟机构	钟表,常用机器,太阳系	普通物理学,如牛顿和爱因斯坦的力学定律及其他
控制机构	恒温装置,伺服机构,生物体的内稳态机构	控制论;反馈与信息论
开放系统	火焰,细胞和普通生物体	(a)将物理理论扩展到在物质流中自我维持的系统(新陈代谢);(b)遗传密码中的信息储存(DNA);目前还不清楚的(a)与(b)之间的联系
低等生物	“类似植物”的生物:系统的渐进分化(生物体中的所谓“分工”);繁殖与机能性个体的区别(“胚迹与体细胞”)	几乎没有理论与模型
动物	信息传输日益重要(感受器的进化,神经系统);学习;意识的起源	自动机理论的出现(刺激—反应关系),反馈(调节现象),自主行为(弛豫振荡)等等
人	符号的使用;其结果有过去与未来、自我与世界、自我意识等;语言通信等	早期的符号理论
社会文化系统	生物种群(包括人类);只有人类才有的由符号决定的社区(文化)	人口动力学、社会学、经济学、(可能还有)历史学中的统计规律与动力学规律;文化系统理论的萌芽
符号系统	语言,逻辑,数学,科学,艺术,道德等等。	符号算法系统(如数学、语法);“游戏规则”,如在视觉艺术、音乐等领域

Bertalanffy L v. *General System Theory*. 1968. 28—29

其中的一种^①。

设系统为 S , 其第一级子系统为 S_i , 第一级子系统之间的关系为 R_i , 那么系统 S 可表示为

$$S = \{S_i \subset S | R_i\} \quad (5.17)$$

$$R_i = \{(S_{I,i}, S_{O,i}) | S_{I,i}, S_{O,i} \subset S,$$

$$S_{O,i} = R(S_{I,i}), S_{I,i} = R(S_{O,i})\}$$

$$S_{I,i} \cap S_{O,i'} = \phi (I, O = 1 \sim n, i, i' = 1 \sim m, i \neq i')$$

设第二级子系统为 S_{ij} , 则

$$S_i = \{S_{ij} \subset S_i | R_{ij}\} \quad (5.18)$$

$$R_{ij} = \{(S_{I,ij}, S_{O,ij}) | S_{I,ij}, S_{O,ij} \subset S_i,$$

$$S_{O,ij} = R(S_{I,ij}), S_{I,ij} = R(S_{O,ij})\}$$

$$S_{I,ij} \cap S_{O,ij'} = \phi (I, O = 1 \sim n, j, j' = 1 \sim p, j \neq j')$$

同样, 设第三级子系统 S_{ijk} , 则

$$S_{ij} = \{S_{ijk} \subset S_{ij} | R_{ijk}\} \quad (5.19)$$

$$R_{ijk} = \{(S_{I,ijk}, S_{O,ijk}) | S_{I,ijk}, S_{O,ijk} \subset S_{ij},$$

$$S_{O,ijk} = R(S_{I,ijk}), S_{I,ijk} = R(S_{O,ijk})\}$$

$$S_{I,ijk} \cap S_{O,ijk'} = \phi (I, O = 1 \sim n, k, k' = 1 \sim q, k \neq k')$$

以此类推, 设 x_c 为这个系统的要素, 则最下层的子系统为

$$S_{ijk \dots \mu} = \{x_c | R_{ijk \dots \omega}\} \quad (5.20)$$

$$(i = 1 \sim m, j = 1 \sim p, k = 1 \sim q, \dots, \mu = 1 \sim \lambda, \omega = 1 \sim \theta)$$

5.3.3 等级性与并列性

一个系统通常由多个等级的子系统构成, 这是等级性的表现; 而在每个等级上存在着多个子系统(或要素), 这是所谓并列性的表现。因此, 研究系统, 既要研究不同等级之间的关系, 又要研究同一

^① 秋山穰, 西川智登. 系统工程. 北京: 机械工业出版社, 1983

等级上不同子系统(或要素)之间的关系,还要研究等级性与并列性之间的关系。在本书第三章,我们已经讨论过要素之间的各种关系,在第五章第1节已经讨论过系统与要素之间的各种关系。在那里得出的一般结论原则上也分别适用于说明不同子系统之间的关系和不同等级之间的关系。因此,这里只讨论等级性与并列性之间的关系。

按照系统定义,一个多级系统至少含有二个第1级子系统,而第1级子系统任一个子系统又至少含有二个第2级子系统,以此类推,在含有 n 个等级的系统中,第 i 级子系统的总数就等于或大于 2^i ,亦即

$$m_i \geq 2^i \quad (5.21)$$

其中 m_i 表示第 i 个等级上的子系统数, $i = 0, 1, 2, \dots$,并规定 m_0 为所研究的系统本身。那么,这一系统的基本单元即要素总数为

$$m_{n-1} \geq 2^{n-1} \quad (5.22)$$

一般地说,如果各等级上的每个子系统均由 h 个下一级子系统组成,那么第 i 等级上的子系统数为

$$m_i \geq h^i \quad (5.23)$$

而要素总数为

$$m_{n-1} \geq h^{n-1} \quad (5.24)$$

其中 n 表示系统的等级数。

例如,当各等级的子系统均由两个下一级子系统构成,系统等级数为四个时,各等级的子系统数见图5—23:

$$m_i = 2^i \quad (5.25)$$

而要素的总数为

$$m_4 = 2^4 = 16$$

系统的等级数与并列要素数之间的关系大致有图5—24所示的四种情况:

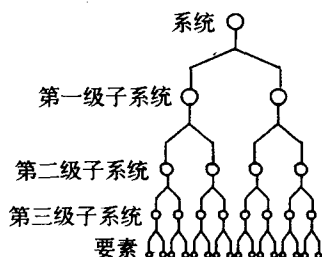


图 5—23 各等级子系统数

要素数 \ 等级数	少	多
多	(2) 多/少	(4) 多/多
少	(1) 少/少	(3) 少/多

图 5—24 等级数与要素数

(1) 要素数少,等级数也少。如果减少图 5—23 中的要素数(或等级数),就可知道这一点。其极端情况是要素数只有两个,这时这个系统就不可能有中间的各子系统层次。

(2) 要素数多,但等级数少。如果在图 5—23 中,由八个要素相结合而构成一个子系统,那么这个系统就只能有三个层次。其极端情况是 16 个要素直接相结合而构成系统,不存在子系统。热力学系统就对应于这种不考虑子系统层次的系统。

(3) 要素数少,但等级数多。当要素数达到或超过三个时,系统就有形成子系统的可能性。有时,虽然其要素数并不多,但却构成多个等级的系统。图 5—23 所示的是当要素数为 16 个时所能构成的等级数最多的一种构成模式。在一些管理系统中可以看到这种情形。例如,一个机构的人数并不多,但存在着多个管理等级。

(4) 要素数多,等级数也多。如在图 5—23 所示的系统构成模式中,要增加一个等级,就得增加 32 个要素,并使原来的要素成为第四级子系统。实际上,这里的第四种情形是在现实生活中很常见的一种情形,如在封建社会职官等级或现时的干部等级中所看到的那样。

如果我们考察要素数、并列子系统数和等级数的变与不变的情

况,就可以勾画出表 5.2。

表 5.2 要素数、并列子系统数与等级数之间的相互关系

要素数	并列子系统数	等级数	可能与否	说 明
不变	不变	不变	○	只要两项不变,第三项必定不变。
不变	不变	变	×	
不变	变	不变	×	
变	不变	不变	×	
不变	变 $\updownarrow$	变 $\updownarrow$	○	各列小横线上面的变化互相对应,各列小横线下方的变化互相对应。
变 $\updownarrow$	不变	变 $\updownarrow$	○	
变 $\updownarrow$	变 $\updownarrow$	不变	○	
变 $\up$	变 $\up$	变 $\up$	○	在改变某一项或某两项时其余项起何种变化,需要具体分析。但是在各行中都有这样的一次机会即先确定某两项的变化来对第三项的变化做出必然性的判断。例如,前两项皆为 $\up$ 时,第三项可能为 $\up$ 或 $\down$,但后两项皆为 $\up$ 时,第一项必然是 $\up$ 。
$\up$	$\up$	$\down$	○	
$\up$	$\down$	$\down$	×	
$\up$	$\down$	$\up$	○	
$\down$	$\down$	$\down$	○	
$\down$	$\down$	$\up$	○	
$\down$	$\up$	$\up$	×	
$\down$	$\up$	$\down$	○	

注: (1) ×表示所列情况不可能发生,○表示可以发生。

(2) $\up$ 表示增加, $\down$ 表示减少。

5.4 适应性

5.4.1 适应性

从本书的第三章和第四章不难看出:世界上的万事万物都可以

看作是系统。因此,系统的种类繁多,数目无穷。这就是系统的多样性。其中,生物的多样性曾被认真研究过。例如,分类学家林耐(Carl von Linné, 1707—1778)在 1758 年只知道有 4235 种动物,但梅尔(Ernst Mayr, 1904—2005)于 1946 年描述过的鸟有 8616 种。梅尔对于动物界各门的估计为

脊椎动物	35600
被囊类和原脊索类	1700
棘皮动物	4700
节肢动物	815000
软体动物	88000
蠕虫类和有关类群	25000
腔肠动物和栉水母类	10000
海绵动物	5000
原生动物	15000
总 计	1000000

埃普灵(Carl Clawson Epling, 1894—1968)估计植物的种类大致为

被子植物	150000
真菌类	70000
苔藓类	15000
藻类	14000
羊齿植物	10000
地钱类	6000
裸子植物	500
总计	265500

现在一般认为,植物大约有 40 多万种,动物约为 150 万种,病毒和细菌之类的微生物约数万种。各个物种互不相同,同一物种中也

没有两个个体完全相同。生物的物种数已这么多,至于生物个体数那就更是惊人。这里说的只是生物。如把其他各种系统都加以考虑,系统的多样性就实在惊人。

但是,在经验世界中更令人惊奇的是,各种系统,不管它属于哪一类型,都显示出与环境相当地和谐。系统的多样性和系统与环境的和谐,促使人们探索其中的奥妙。人们逐步认识到:系统为了生存必须适合于其环境,而任何系统的结构与功能,在一定的环境中,都适合于系统的生存,这正是由于系统的结构与功能是在一定环境中形成的。

各种系统都适合于它们的环境,但环境处在不断的变化中,因而只有那些随环境变化而发生相应变化的系统,才能适合于不断变化的环境而继续生存下去。我们把这种能使系统适合于其环境的性质称为系统的适应性。对环境不适应的系统不能生存,只有适应于环境的系统才能生存。适应性是系统生存与进化的基本条件,是系统与环境的统一。

但是,如何表述适应性,尚无统一看法。由于“适应”和“适应性”原来是生物学和心理学上的概念,我们先看《辞海》中关于这两个概念的解释^①。

“适应:①生物在生存竞争中适合环境条件而形成一定性状的现象。它是自然选择的结果。例如生活在冰雪环境中的北极熊是白色的,不易被发现,有保护作用;生长于沙漠中的仙人掌,叶子是针状的,以减少蒸腾。②在心理学上指感觉适应,即感受器在刺激持续作用下所产生的感受性的提高或降低的变化。如从亮处走进暗室,起初几乎什么都看不见,经过对弱光的感受性的逐步提高,视觉慢慢恢复,叫‘暗适应’。反之,从暗室走向明处时,在最初一瞬间会感到耀眼发眩,什么都看不清楚,过了几秒钟,由于对强光的感受性较快地

① 辞海(缩印本),上海:上海辞书出版社,1979年版,1050

降低,视觉随即恢复正常,叫‘光适应’或‘明适应’。夜盲是暗适应能力减弱的结果。适应在嗅觉、听觉、肤觉、味觉等方面也会发生,在痛觉方面则不甚显著。”

“适应性:生物体随外界环境条件的改变而改变自身的特性或生活方式的能力。”

不难看出,生物学上的适应和心理学上的适应在含义上是有区别的。两者最基本的区别在于:在生物学上,适应不仅包含生物功能的变化,还包含结构和形态上的变化;但是在心理学上适应只有功能上的意义,它不包含结构上的意义。另外,这里所给出的“适应性”概念只是生物学上的适应性,不包含心理学上的适应性。实际上,用类似方式可定义心理学上的适应性。

在生物学上,杜布赞斯基(Theodosius Dobzhansky, 1900—1975)关于适应性的解释是值得介绍的。他认为:每一生物都适合于占据和利用一定的生存场所。生存场所在空间上的变化导致异地分布生物和同地分布生物的多样性;生存场所在时间上的变化导致生物随着这种时间过程而发生相应的改变。他进一步指出:每个生物都可以看作是器官或性状的组合,以及也是决定这些性状的基因的组合。在各种生物中实际存在的基因组合的数目,只不过是可能组合数的一个极微小部分。所有可能组合构成一个多维空间,在此空间内,每个实际存在或可能存在的生物都有它的地位。他说道:“现存的和可能有的组合,可以按照它们对于世界上现有环境的生存适合性而加以分级。有些设想中的组合,事实上是其中的绝大多数,在任何环境中都是不调和的和不适合生存的。有一些则适合生存于某些生态场所和生态龛(ecological niches)中。总起来说,有关的基因组合在适应值上是相同的。所以,基因组合场可以最简单地想象为一个地形图,图中的等高线象征着不同组合的适应值(图5—25)。因此,具有能够使生物占据一定生态龛的有关基因组合的类群,是以

处在这种场中不同部分的‘适应峰’(adaptive peaks)来表示的(图 5—25 中的正号)。而使携带者不宜生存于任何现有环境中的不利基因组合,是以峰间的‘适应谷’(adaptive valleys)来表示的(图 5—25 中的负号)。”^①

在系统学中,系统对环境的适应性实际上是生物学中适应性概念的扩展和延伸。为了确切地描述系统的适应性,人们提出了各种方案。这里介绍其中的三种^②。

1. 斯克兰斯基的观点

斯克兰斯基(Jack Sklansky, 1928—)认为:一个系统,如果在变化的环境中能坚持成功的行为,那它就是适应的;而所谓成功的量度可以看作是稳定性和可靠性,即是说,适应性可视为稳定性和可靠性的并。

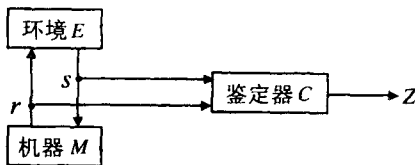


图 5—26 MEC 组态

在 MEC 组态中,可从稳定性和/或可靠性考察机器 M 的适应性。当环境 E 变化时,若 Z 保持在某个规定范围内,则机器 M 是稳定的;当机器 M

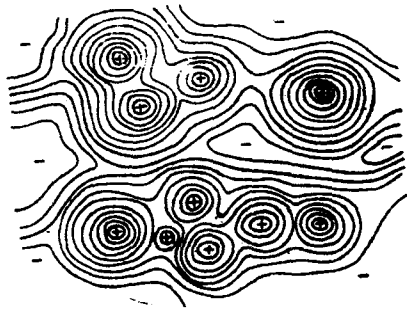


图 5—25 基因组合场内的
适应峰和适应谷
等高线代表基因型的适应值
(达尔文式的适应性)

用图 5—26 所示的 MEC 组态可说明机器 M 的适应性。机器的输入为“刺激”s;机器的输出为“响应”r;机器的成功量度由鉴定器的输出,即由“有效性”量度 Z 来给出。在 MEC 组

① 杜布赞斯基 T. 遗传与物种起源. 北京:科学出版社,1953, 5—7

② 前两种解释参看:格洛里索 R M. 工程控制. 北京:科学出版社,1981

变化时,若 Z 保持在某个规定范围内,则机器 M 是可靠的。在这两种情况下,机器 M 都是适应于环境的。

2. 扎德的观点

扎德从系统的外部描述出发,认为:一个适应性系统,对于它的环境变化是不敏感的。

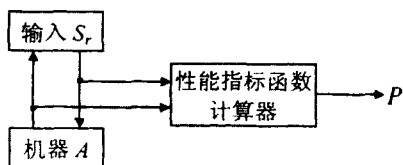


图 5—27 改进的 MEC 组态

扎德为此而提出的机器及其输入和输出函数的表示,与斯克兰斯基的 MEC 组态是类似的,如图 5—27 所示。图中,作用于机器 A 的是输入函数集 S_r , $\triangleq \{u\}$, 输入向量 u 的分量既有

输入或刺激变量,也有其他环境因素,还有机器 A 的故障部分。机器 A 的性能由性能函数 P 度量,当输入为 S_r 时,性能函数为 $P(r)$ 。如果输出映照 $P(r)$ 满足 $P(r) \subset W$, 其中 W 是容许性能函数集,则可以认为该系统的运行是令人满意的。所有可能的输入条件集是 $r \subset L$, 其中 L 是 r 值的一个特定集。

这样,我们可考察系统的适应性:系统 A 如果相对于 $\{S_r\}$ 和 W 运转得相当满意,则称该系统对于 $\{S_r\}$ 和 W 是适应的。

在扎德的适应性定义中并没有把适应性和可靠性明显地联系起来,但是因为扎德把机器故障所引起的变化也包含在输入向量 u 中,所以正如斯克兰斯基所指出,扎德所提出的适应性可以看成是稳定性和可靠性的并。

3. 拉兹洛的观点

拉兹洛在他的所谓系统控制论^①中认为:系统的适应过程包括

^① Laszlo E. *Introduction to Systems Philosophy*. New York: Jordon and Breach, 1972. 38—47

自稳过程和自组过程,自稳过程使系统维持原有的组织状态,自组过程则使系统趋于负熵增加的组织状态。

拉兹洛认为,假如一个系统完全由自身的固定力所支配,它就会保持一个恒定的稳态。当除了内部固定力之外,还存在一些来自环境的非约束力时,系统的状态将由这两种力的相互作用而发生变化。如果施加于系统的非约束力所引起的扰动不超出系统的自稳范围,这个系统终究会恢复到由其恒定的内部力所规定的原有状态。另一方面,如果系统受到某种恒定约束力的作用,那么系统就会重新组织其内部固定力,加强对环境扰动的抗力,并向新的稳定状态发展。在这自组织过程中,系统的结构趋于复杂,等级趋于增多,适应性趋于增强。

他进一步指出:一个适应性自组织系统不一定是一个很稳定的系统,适应性与稳定性并不是同义语。适应性系统对那些引起自组织的外部压力有最顽强的抗力,但它对来自环境的其他因素并不具有较大抗力。因此,一般来讲,系统越加强适应能力,就越趋于不稳定状态,同时系统以范围较广的自稳功能去弥补自身不稳定的复杂结构。

在上述几种解释的基础上,我们试图为系统的适应性赋予最广泛的含义,并认为一切系统都具有对环境的适应性。斯克兰斯基和扎德把适应性看作稳定性与可靠性之并的观点有其合理之处,但也有值得商榷之处。首先,稳定性是与适应性有关的,不稳定的系统如不恢复原来的稳定状态或进入新的稳定状态就不能适应于环境。但是,适应过程并非总是稳定性增大的过程。而且,李亚普诺夫意义下的稳定性并非总是跟适应性连在一起,因为初值(初始条件)的变化不一定来自环境。这就是说,稳定性的部分内容并不包含于适应性中。其次,稳定性和可靠性所表示的是系统在环境变化和自身变化中的某种不变性,但是适应性应当包含更多的内容。系统对环境的

适应,不仅包括静态适应而且包括动态适应。这样,系统的适应性不仅包括适合于环境的那些系统特征的不变性,而且包括不适合于环境的那些系统特征的可变性,还包括为提高适合于环境的程度所需的可变性。在这些变化中,系统从一种适应状态过渡到另一种适应状态,或者说从一个适应峰过渡到另一个适应峰。这是一个系统的结构和功能得到调整的过程,是系统的内部秩序得到调整的过程。例如,在上面提到的暗适应、明适应等感觉适应中所表现出来的适应性既不能用稳定性概念解释,也不能用可靠性概念解释。如果说这只是系统在功能上的调整,那么我们从生物进化等现象中可以看到,当环境的变化导致系统原有结构与功能无法适应环境时,就会有新的结构和功能从中产生。第三,系统的适应性变化既可能是由于环境的变化使系统的原结构与原功能的适应值下降,但也可能在环境不变的情况下发生。也就是说,在环境不变的情况下,系统也有可能调整自己的结构与功能,使之更适应环境,或者造出更适合于环境的新结构与新功能模式。对这种变化是很难用稳定性概念加以解释的。

从上面的讨论中也能看出,拉兹洛把自稳过程和自组过程加以区分是完全正确的,而且把自组过程看作是一种适应过程也是正确的。但是,有必要指出的是,系统的适应过程中不仅有自组织过程,而且有他组织过程。

考虑到以上几点,我们将系统调整自己内部秩序,调整自己结构与功能,使之适合于(或更适合于)环境的能力,称为系统的整序性。那么,作为适应性表现出来的稳定性可视为整序性的特殊情形,而系统的稳定状态可视为即使不加调整或几乎不加调整也适合于环境的状态。当然,稳定性不能取代整序性,整序性也不能取代稳定性;两者在内容上有相互交错的部分,但两者之间的差别也是很明显的。

综上所述,我们可将系统的适应性看作是整序性和可靠性的并;

在不同情况下,它或者由整序性体现,或者由可靠性体现,或者由整序性和可靠性共同体现。

5.4.2 可靠性

可靠性是体现适应性的较简单的性质。一个系统,在一段时间内,在给定的条件下能正常地工作,就说该系统是可靠的,否则就是不可靠的。通常,当一个系统的局部出现故障时,系统总体还是能正常工作,则称该系统是可靠的,否则就是不可靠的。

一、可靠性事例:以人体为例

可靠性问题受到人们重视始于第一台电子计算机的出现。20世纪40年代的ENIAC用了18000个电子管,当时选用可靠性很高的元件,但这台计算机的平均故障间隔时间只有五分钟左右。自那以后,可靠性理论得到了迅速的发展。人们为提高各种机械、装置和其他人造系统的可靠性作了各种努力,并获得了成功,从而使这些系统的适应性有了提高。

但是,可靠性问题并不只是一个机械设计和机械工程中的问题。我们在各种各样的具体系统中都可以发现可靠性起着非常重要的作用。现在,我们来看人体不同部分结构中表现的可靠性。工程师在结构设计中往往使实际结构的承受力要比理论估计值大几倍、十几倍或几十倍。实际上,人体就是这样一个具有宽阔安全界限的系统,在这个界限内人体是可靠的。现看几个例子^①。

1. 人体血糖

人体血糖常保持在90mg%—100mg%(指100cm³血液中的葡萄糖含量)的水平上,但实际并不需要这么高,它可降到65mg%—70mg%,有时还可以更低而不会导致不适。一般,只有在45mg%—

^① 坎农 W B. 躯体的智慧. 北京:商务印书馆,1982. 140—145

50mg%的低水平时才出现严重问题。

2. 人体血压

人体的正常收缩血压是 110mm—120mm 汞柱,它可降到 70mm—80mm 汞柱(即约减少三分之一)而不致引起供血不足。在抽出大量血液,甚至多达通常血容量的 30%—40%后,血压仍可以迅速回升到正常水平。人体有一系列机构保证维持充分的血液流通。血管舒缩中枢位于最靠近脊髓的脑部(延髓)。当该部分遭到损伤时,由辅助中枢代而控制;当辅助中枢被除掉时,交感神经节就代而居支配地位;如除掉全部交感神经,则由血管壁根据血管内的血量来调节血管的容积。因此,只要血量不减少到某个最少程度,血压仍可保持为接近正常的水平。

3. 肺的可靠性

肺的可靠性也很大。即使在肺的大部分被破坏的情况下,人仍能活着。即使在一侧肺萎陷以致不能换气,或在半个肺被切除的情况下,人体的氧气供应或二氧化碳的排除也不会遇到严重困难。肺的安全系数至少是 2。

4. 其他成对器官

人体结构中许多成对器官的存在对于提高人体可靠性有重要意义。一般来讲,切除这些成对器官中的一个并不影响人的生存和正常的工作效率。两侧肾可以切除一个(实际上甚至切除每侧肾的三分之二)而不发生肾功能的严重障碍,尿液分泌的量和成分保持不变。又如,完全摘除甲状腺会导致粘液水肿,使人体代谢低下,反应迟缓,皮肤干厚,并出现其他不正常后果。但是,如果只摘除其五分之四,就不会出现上述症状。神经系统的可靠性更为惊人。神经系统在它的成千个细胞被切除或破坏时,仍能有效地工作。

5. 不成对器官

人体不成对器官的安全系统要比成对器官的更为重要。胰腺分

泌的胰岛素是人体对糖的正常利用所必需的。完全摘除胰腺会立即产生严重的糖尿病。但切除其五分之四,保留五分之一,还是能满足人体对胰岛素的需要。肝脏也许是体内最繁忙和最具有多方面功能的器官。在英语中,肝脏为 liver,而生存为 live,这似乎也表明肝脏对生存的重要性。但是,切除其四分之三而仍不引起对生存的严重障碍。消化道从其结构上看也是大大超过其功能需要的。胃被切除大部而消化和营养并未受到严重损害。切除约 10 英尺小肠而病人并未遭受重大的有害后果。在许多病例中切除大部分大肠反而会带来有利的效果。

所有这些实例,都可说明麦尔策(Samuel James Meltzer, 1851—1920)的下述观点是正确的:

“大多数器官内所具有的活动组织大大超过了这些器官正常机能的需要。某些器官中这种多余量达到实际需要量的五倍、十倍甚至十五倍。生殖器官的组织,为保证其机能的成功,存在着惊人的过剩和耗费现象。此外,某些器官如心脏、横膈等拥有的潜在能量十分丰富,远远超过了正常生命活动的需要。许多机能装置是双重或三重的,以保证机能的迅速运转。在许多例子中,一个器官的机能得到了其他器官的及时支援。安全系数的保持还得到了活的机体所特有的自我修复的机制的支持。这样我们就可以有把握地说,有生命机体的结构装备不是建立在节省的原则上。相反,组织与机制的超量现象,明确地反映了安全才是动物机体的目的。”^①

二、可靠性的数学描述

系统的可靠性可用各种定量指标来度量。例如,无故障率、可靠度、无故障工作时间的分布密度、平均无故障工作时间等都可作为可靠性的度量指标。这里看可靠度。所谓可靠度,是指系统在时间间

^① 坎农 W B. 躯体的智慧. 北京:商务印书馆,1982. 145—146

隔 t 内无故障即正常工作的概率,记为 $R(t)$ 。与之对应,不可靠度是指在这段时间内发生故障的概率,记为 $Q(t)$ 。那么

$$Q(t) = 1 - R(t) \quad (5.26)$$

系统的无故障工作时间 T 是一个随机变量,而不可靠度 $Q(t)$ 实际上就是随机变量 T 的分布函数:

$$Q(t) = P(T \leq t) = F(t) \quad (5.27)$$

因此,可靠度

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (5.28)$$

从图 5—28 可知两者之间的关系。不可靠度 $Q(t)$ 是 t 的非减函数;当 $t=0$ 时, $Q(t)=0$; 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $Q(t)$ 趋近于 1。相应地,可靠度 $R(t)$ 是 t 的非增函数;当 $t=0$ 时, $R(t)=1$; 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $R(t) \rightarrow 0$ 。

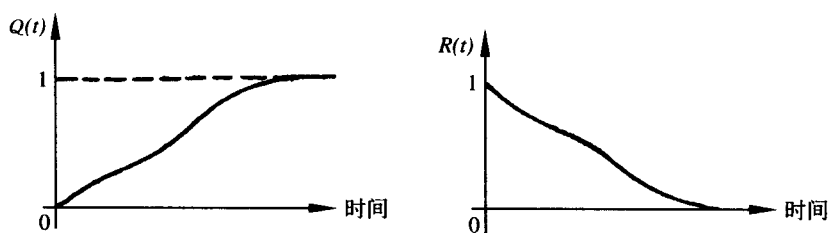


图 5—28 不可靠度与可靠度的时间变化

系统的可靠性取决于两个因子:(1)各要素的可靠性;(2)各要素之间的相互关系。如果要素的可靠性大,自然有助于提高系统的可靠性,尤其在由少数的几个要素组成的系统中要素的可靠性对系统可靠性的影响很明显。但是在由大量要素组成的系统中,要素之间的关系对于系统可靠性有巨大影响。

要素之间的相互关系从其连接方式上可分为串联回路、并联回路和复合回路。

1. 串联系统

在串联系统(图 5—29)中,只要一个要素发生故障,整个系统就

无法工作。例如,一个链条的牢固程度与组成它的最薄弱链环的牢固程度相同。又如,在一个多

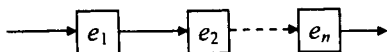


图 5—29 串联系统

级火箭中,第一级正常工作后,必须点燃第二级,使它也正常工作,然后自行脱落;以后各级依次如此,只要某一级出现故障,整个火箭就无法继续工作。系统的可靠性由支撑同样负荷的每个要素的可靠性决定。当每个要素的可靠性为相互独立时,串联系统的可靠性为

$$R = \prod_{i=1}^n p_i = p_1 \times p_2 \times \cdots \times p_n \quad (5.29)$$

其中, $p_1, p_2, \dots, p_n$ 表示各要素的可靠性概率。与之对应,串联系统的故障概率为

$$Q = 1 - R = 1 - (p_1 \times p_2 \times \cdots \times p_n) \quad (5.30)$$

例如,一个计算机的控制器由 100 个不同逻辑电平组成,其中每一个逻辑电平的故障概率为 0.01,那么该控制器的可靠性 R 为

$$R = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n (1 - q_i) = (1 - 0.01)^{100} \approx 0.37$$

这就表明,这个系统每一要素的可靠性为 0.99,但整个系统的可靠性只有 0.37。在为提高串联系统可靠性的努力中,人们发现:在各个要素可靠性之和为常数时,若这些要素的可靠性均等,则其系统可靠性最大;若这些要素的可靠性不均等,则其系统可靠性较小。^① 也就是说,如果

$$\sum_{i=1}^n p_i = c(\text{常数}), i = 1, 2, \dots, n \quad (5.31)$$

则当 $p_1 = p_2 = \cdots = p_n$ 时,

$$\prod_{i=1}^n p_i = \max \quad (5.32)$$

① 张沁文,最大概率乘积定理及其应用.农村发展探索,1982.(8)

2. 并联系统

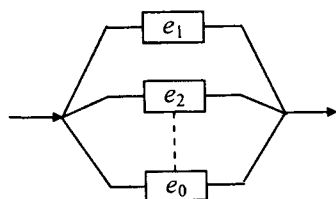


图 5—30 并联系统

在并联系统(图 5—30)中,当且仅当一切要素发生故障时,系统才发生故障。系统的总可靠性要比每一要素的可靠性大。我们在讨论人体可靠性的许多实例时,已看到人体内的许多并联结构。当各要素的可靠性相互独立时,系统的可靠性 R 为

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (5.33)$$

其中, $p_1, p_2, \dots, p_n$ 表示各要素的可靠性概率。易知,一个可靠性大的系统可由一些可靠性小的要素来构造。例如,当 $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = 0.5$ 时, $R \approx 0.97$ 。

由此可知,为提高系统可靠性,要采用冗余元件。这些冗余元件,可使之处于同时运行状态,亦可使之作为备件待用,只当需要时才被调用。在人体结构中,这两种情形都存在。

3. 串并联复合系统

在稍微复杂的系统中,既有串联,又有并联,以此构成复合系统。在这种系统中,系统结构对系统可靠性关系很大。例如,图 5—31(a)与图 5—31(b)表示,这两个系统的元件种类与数量都相同,但其结构不同,结果系统(b)的可靠性 R_b 大于系统(a)的可靠性 R_a 。

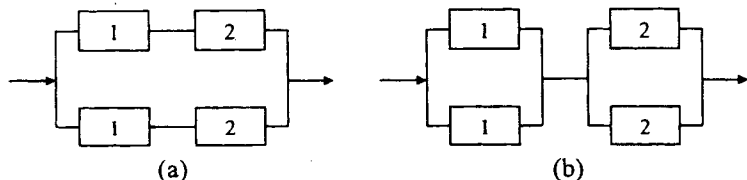


图 5—31 系统结构与可靠性

这可由下式看出：

$$R_a = 1 - (1 - R_1 R_2)^2 \quad (5.34)$$

$$R_b = \{1 - (1 - R_1)^2\} \{1 - (1 - R_2)^2\} \quad (5.35)$$

这里, R_1 和 R_2 分别表示元件 1 和元件 2 的可靠性。经运算可知,

$$R_b > R_a$$

如果取 $R_1 = 0.9, R_2 = 0.8$, 则 $R_a \approx 0.92, R_b \approx 0.95$, 故 $R_b > R_a$ 。可见, 从可靠性上看, 系统(b)的结构要比系统(a)合理。

从以上的讨论可知, 提高系统的可靠性有五个途径: 一是提高要素的可靠性, 二是在串联回路中尽可能减少要素数目, 三是在串联回路中尽可能采用可靠性相等的要素, 四是在并联回路中多使用冗余要素, 五是在串并联复合系统中采用优化结构。这里, 使用多少冗余要素, 如何使用这些冗余要素, 需要根据系统与环境的具体情况具体处理。对一个系统来说, 大量冗余要素的存在对于它适应变化不定的环境有着十分重要的意义。但是, 由于这些冗余要素的存在, 系统必须付出较大代价, 耗费大量资源。这有可能反过来成为使系统走向毁灭的直接原因。

在可靠性问题上还需要指出的是, 系统的可靠性是对一定限度而言的。一个系统, 如果所遭受的打击超过一定限度, 或系统的要素所遭受的破坏超过一定限度, 它就无法继续保持可靠。这时, 由可靠性体现的那部分适应性就不再起作用。在这种情况下, 系统能否继续适应环境, 能否继续生存, 以及以何种方式继续生存, 将取决于系统的整序性。

5.4.3 整序性

对于适应性来说, 比可靠性更重要的是整序性。所谓整序性, 是指系统调整自己的有序性的能力, 也就是指系统调整其结构与功能的能力。系统调整内部秩序, 既可以在环境变化的情况下发生, 亦可

以在环境不变的情况下发生。整序过程最终是使系统适合于环境,或者使系统更适合于环境。

系统的有序性必须从质的方面和量的方面去考察。有序性的质的方面是指序的性质。不同质的系统有不同质的序。我们在本书第三章关于结构与功能的讨论中看到过各种各样的序。在系统中,结构的区别、功能的区别都与序的区别连在一起。我们在第四章中所列举的各种不同系统,其内在的序当然也是不同的。我们在第五章第1节关于系统质的规定方式的讨论中,已充分强调了要素的排列次序或耦合关系的重要性。在考察序的时候,不仅要重视其形式,而且要重视其内容。只要两个系统在质的方面是不同的,就可以发现两者的序在内容上的区别,即使两者在形式上相同也是如此。

有序性的量的方面是指有序程度的大小,通常以有序度来表示。对于不同的系统,能否以统一的有序度函数来表示其有序程度,尚无定论。但是,在可用熵(关于熵概念,参看本书第六章)来表示系统状态无序度的那些系统中,系统的有序度可表示为

$$R = 1 - \frac{H}{H_{\max}} \quad (5.36)$$

其中 H 表示系统在时刻 t 的熵, $H_{\max}$ 表示系统的可能最大熵。任何系统的有序度只在 0 和 1 之间变化,在完全无序的系统中 R 取 0 值,而在理想的有序系统中 R 取值 1。

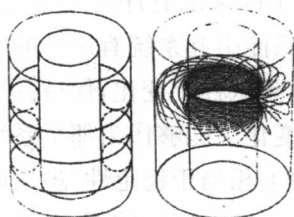
既然有序性要从量与质两个方面进行考察,整序性也要从量与质两个方面上研究。一方面要考察系统有序度的变化,另一方面要考察系统的序性质的变化;前者是量变,而后者是质变。

与此同时,整序性还可以从序不变情形和序变情形中研究。为此,引入保序性和变序性概念,并认为整序性可分为保序性和变序性。

所谓保序性,是指系统在环境的各种影响下保持其有序性的能力,环境对系统的作用包括一些恒定输入和各种随机涨落。这些作用可能导致系统的序性质的改变,也可能导致系统有序度的改变。但是,对于一定临界值以内的作用而言,它只能引起系统有序性的小变化,而系统却能以本身所固有的力量来消除这种小变化,保持其原有的有序性。保序性使一个系统在环境的变化中能够作为那个系统而生存下去。不难看出,这里的保序性大致上相当于稳定性,虽然两者之间亦有某些区别。在保序性的作用下,系统的序性质不变,而系统的有序度也可以不变,或者有微小变化。

所谓变序性,是指系统在环境的各种影响下改变其有序性的能力。当环境的作用或变化超过某一临界值时,系统就无法保持其序性质,系统的保序能力无法抵制来自环境的作用所引起的系统有序性的变化。由保序性体现的系统适应性已无法使该系统继续适合于变化了的环境及其作用。原来的系统有三个“出路”,一是转化为能适合于新环境的系统,另一是转移到能容纳它的环境中去,而在这两种努力都遭到失败的情况下它只能瓦解或崩溃。当一个系统转化为能适合于新环境的系统时,原来的系统就改变其序性质,改变其结构与功能。这里就出现这样的问题:原来的系统是否继续存在?实际上,这是一个极为复杂的问题。从某种意义上,新系统与原系统之间存在着质的差别,因此原系统已不复存在,新系统已不再是原系统。但是,新系统是从原系统进化而成的,因此从某种意义上说,新系统“包含着”原系统。也就是说,原系统不是被消灭,而只是被扬弃。此外,如同将在第七章中所能看到的那样,一个系统某些结构特性或功能特性的改变并不直接意味着这个系统已不复存在。因此,在序变过程中,原系统是否继续存在,这要根据系统质的规定性的有关原理才能做出正确的判断。我们在各种系统的进化中观察到序性质的各种变化。例如,从无机物到有机物、从核酸和蛋白质到原生细胞、从

低级生物到高级生物的进化过程,对于整个物质系统来说,是有序度增加的过程,而对于其中的各具体系统来说,则是序性质的变化过程。



(a) (b)

图 5—32 泰勒不稳定性

(a)滚动的图示;(b)滚动中一个液体粒子的轨道。该图表示形成了两个滚动,但只画出了粒子在上部滚动中的运动。

又如,在所谓泰勒(Geoffrey Ingram Taylor, 1886—1975)不稳定性现象中,考虑两个同轴圆筒间运动的流体,见图 5—32,当固定外圆筒而使内圆筒以不同转速旋转时,可观察到流体从一种序接二连三地转化为另一种序。当转速较低时,流体中出现同轴流线;当转速增加到一个临界值时,在轴的横向层中形成流体周期地向里和向外运动的滚动模式;当转速增加到第二个临界值时,滚动便以一确定的基频开始振荡;当转速更高时,滚动便以两种频率振荡;最后当转速

更大时就出现混沌现象。可见,随着内圆筒转速的增加,流体的序性质也发生变化。也就是说,在某一条件下与环境相适应的旧序转化为在另一条件下与环境相适应的新序。

但是,如我们已指出,序的变化与环境变化之间的关系是错综复杂的。当环境变化时,系统的序可变可不变;当环境不变时,系统的序亦可变可不变;也就是说,不管环境变不变,系统的序都有可能变化。这表明,必须从系统与环境的相互作用中解释系统的适应过程。

如果从量的方面考察系统序的变化,就可知道,在保序过程中系统的有序度不变,如系统保持稳定时就是如此;在增序过程中系统的有序度增大,如原子结合成分子;在减序过程中系统的有序度减小,如复杂化合物分解成各个单元分子。有序度(R)的变化可记为

$$(1) \quad \frac{dR}{dt} = 0, \quad \text{保序过程} \quad (5.37)$$

$$(2) \frac{dR}{dt} > 0, \quad \text{增序过程} \quad (5.38)$$

$$(3) \frac{dR}{dt} < 0, \quad \text{减序过程} \quad (5.39)$$

以上,我们分别讨论了系统的可靠性和整序性。它们或者单独地或者共同地决定着系统对环境的适应过程。各种系统适应其环境的方式千差万别,但是它们在都具有适应性这一点上又是一致的。适应性是系统存在与进化的一个必要条件,而对大量系统来说进化又是适应的一个必要条件。一个系统如果完全丧失适应性,就要被淘汰。因此,它为了生存,或者千方百计地维持其适应性,或者向适合于环境的方向进化。

5.5 历时性

至此为止,我们已简要地讨论了系统的四种基本性质,即整体性、稳定性、适应性和等级性。这四种性质似乎可以认作是与时间无关的,因而即使不考虑时间因子也可以说明这些性质。在讨论有些性质(如稳定性、适应性)时,有时候我们使用了时间因子,但是在那里时间并非作为说明那些性质的必不可少的因子而被引入讨论中的。时间仅仅被看作是描述系统性质的一个参数,因而时间与那些系统性质之间的内在联系尚未被揭示。

但是,自从赫拉克利特以来,一切辩证法家都相信:万物皆流,万物皆变,一个人不能两次踏进同一条河流。运动是永恒的,变化是绝对的。任何系统,任何系统的结构与功能,任何系统的整体性、稳定性、适应性和等级性,无不处在历时变化中。因此,系统的存在本身应被看作是这种历时变化的结果,系统的历时性应被看作是系统的基本性质之一。这样,时间不再仅仅被视为人们为描述系统及其某

种性质而引入的参量,而被合理地看作是决定系统变化的自变量,它的变化导致系统及其性质的变化。

在讨论历时性的基本内容之前,我们先来回顾一下关于时间的一般理论。

5.5.1 时间

20 世纪初的物理学革命引起了时空观的根本变革,牛顿的时空观被爱因斯坦的时空观取而代之。牛顿曾经认为,空间像一个大箱子,与物质运动无关,时间像一条川流不息的河流,永远均匀地向前流逝。他说:“绝对空间就其本身性质说,与外界无关,总是一样的和固定不动的”;“绝对的真正的数学的时间,就它本身性质来说,它均匀流逝,与外界毫无关系。”在牛顿看来,时间与空间无关,时间、空间与物质无关。爱因斯坦彻底推翻这种时空观,建立了一种新的时空观。在爱因斯坦看来,时间与空间不仅相互有关,而且与物质不可分离。又一值得注意的事实是:这一新的时空观不是哲学思辨的产物,而是深深地扎根于物理学中,并且它本身就是物理学的成果。

在物理学中,为了描述物体的位置与运动而引入各种参考系,并规定其中的空间坐标和时间坐标。许多物理量通常被表示为空间坐标

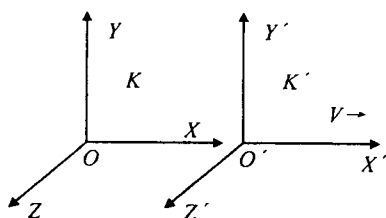


图 5—33 说明洛伦兹变换的图示

标和时间坐标的函数。在牛顿力学中,时间坐标和空间坐标从一个惯性参考系变换到另一个惯性参考系时,所遵循的是伽利略变换。现在考虑一个惯性系 K 和另一惯性系 K' ,假定 K' 相对于 K 以等速度 V 运动(图 5—33)。同一事件在 K 内的坐标为 x, y, z ,

t ,而在 K' 内的坐标为 x', y', z', t' 。再假定 K' 沿 X 方向运动,即两个惯性系在 Y 方向和 Z 方向没有相对运动。进一步假定当两者的原点 O 和 O' 重合时, $t = 0, t' = 0$ 。这时,所谓伽利略变换是指两个惯性系内的时间空间坐标有下列变换关系:

$$\left. \begin{aligned} x &= x' + vt' \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= t' \end{aligned} \right\} \quad (5.40)$$

从伽利略变换可知:时间坐标与空间坐标相互无关;在任何惯性系中空间间隔都一样;在任何参考系中时间间隔都一样。因此,不同惯性系之间的坐标变换只需考虑因空间坐标原点的相对运动而产生的空间坐标差异,不用考虑时间坐标。在伽利略变换下,力学中的三个基本量即长度、质量和时间都与观察者的相对运动无关。

在伽利略变换下,在不同的惯性系中牛顿运动方程具有相同的形式,但是电动力学的麦克斯韦方程却有了变化。这就促使爱因斯坦用统一的时空来考虑时间和空间,用洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz, 1853—1928)变换给出不同惯性系中的时空坐标变换。在与上面相同的假定下,洛伦兹变换表示同一事件在两个相对运动的惯性系内的时间空间坐标有下列关系:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{aligned} \right\} \quad (5.41)$$

其中 c 为真空中的光速。

从洛伦兹变换可以得出许多与从伽利略变换得出的结论相反的

结论。例如(只列举与时间有关的内容):

(1) 时间坐标与空间坐标密切有关。所谓闵可夫斯基四维空间就表示这两者之间的关系。闵可夫斯基(Hermann Minkowski, 1864—1909)曾经说道:“从今以后,空间本身和时间本身都已成为阴影,只有两者的结合才保持独立的存在。”^①在四维空间中,时间被看作是三个空间坐标之外的第四个坐标。这样,时空间隔由表达式

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + (icdt)^2 \quad (5.42)$$

即

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 \quad (5.43)$$

给出。就四维时空中任意两个事件而言,不论从哪个参考系上观察, ds^2 都是不变量,即是说,在任何惯性参考系中时空间隔总是保持不变。时间和空间在数学上得到了统一,从而所有的物理事件都被看作是发生在统一的四维时空世界里。

(2) 在不同惯性系中,空间间隔都不同;在不同参考系中,时间间隔也不同。当一个物体相对于观察者运动时,其运动方向上的长度要比静止时缩短;而固定在这个物体上的时钟要比静止时变慢。可用下列式子表示:

$$L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (5.44)$$

$$t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (5.45)$$

其中, L_0 为本征长度, t_0 为本征时间, v 为物体的运动速度。

(3) 设一列火车以速度 v_1 相对于地面运动,一个旅客以速度 v_2 相对于火车运动。对于经典力学来说,旅客相对于地面的运动速度 V 为

$$V = v_1 + v_2 \quad (5.46)$$

但是,当 v_1 和 v_2 很大,从而使 V 可能超出光速 c 时,这个关系式就不再成立,相对论性速度相加公式是

① 爱因斯坦文集(第1卷). 北京:商务印书馆,1977. 245

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad (5.47)$$

即使 $v_1 = c, v_2 < c$, 或 $v_1 = v_2 = c$, 都有

$$V = c \quad (5.48)$$

这说明,任何速度与光速相加都不能使光速增加,或者说光速与光源的速度无关。

(4) “同时性”由一个绝对的概念变成相对的概念。对“同时”的相对性问题,将在下一节详细讨论。

(5) 狭义相对论的这些成果有力地推动了时空观的发展。人们已认识到:时间对于空间,或者空间对于时间都不是独立的,“同时性”、“时间间隔”、“空间间隔”等都与参考系的运动有关。这显然是一个革命性的进步。但是,时间、空间或时空,仍然被看作是独立于物质(包括场)而存在的。也就是说,所谓四维空间的引入也未能消除“空虚空间”,即被当作“箱子”的空间。康德曾试图以否认空间的客观性的方式来消除牛顿的绝对空间,但这不是解决问题的正确途径。笛卡儿关于空间与物质不可分的想法最后还是在爱因斯坦的广义相对论中得到了科学的说明。他根据物体的惯性质量同引力质量在数值上相等这一经验事实,提出所谓等效原理。另一方面,他把相对性原理从惯性系推广到一切参考系,提出所谓广义相对性原理。据此创立的广义相对论把时空考虑为四维黎曼(Bernhard Riemann, 1826—1866)空间。在这个空间中所有参考系都是等价的,空间的各个位置上都有不同的时钟。这个空间的弯曲导致引力相互作用。引力被看作是物质的存在与分布状态使时空性质变得不均匀的结果。物体的几何形状与时钟的运行都是与引力场有关的,而引力场又是与物质的质量分布有关的。所以,时空是与物质不可分的,不是独立于物质的。物质的密度越大,引力场就越强,而引力场越强,空间就

会发生更大的弯曲,时间过程就会越慢。

5.5.2 变化需要时间

牛顿力学的一个基本前提,是对于一切惯性系存在着普适的时间标度。在这种时间标度下,不同惯性系上的观察者对于两个事件的发生是否同时不会发生分歧。在伽利略变换中, $t=t'$,这意味着在牛顿力学中同时性是一个绝对概念,它与参考系的选取与运动无关。

可惜,绝对的同时性并不是事情的本来面目。如图 5—34 所示,

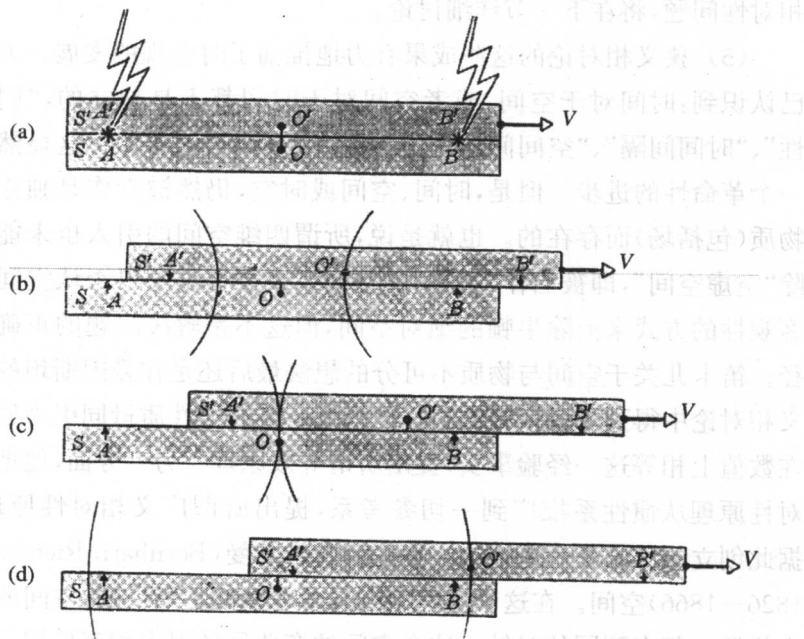


图 5—34 S 参考系的观点, S' 参考系向右移动。

(a)表示光正好从 AA' 和 BB' 发出。以后的图相应于事件 AA' 和事件 BB' 对于 S 系是同时的假定;(b)表示一个波前到达 O' ;(c)表示两个波前到达 O ;(d)表示另一个波前到达 O' 。见:瑞斯尼克 R. 相对论和早期量子论中的基本概念,上海:上海科学技术出版社,1978. 49

设有两个惯性系 S 和 S' , 每个惯性系都有自己的米尺和校准好了的时钟。设两个闪电击中这两个惯性系并留下永久标记, 在 S 上是 A 与 B , 在 S' 上是 A' 与 B' , 而两个观察者分别在 O 与 O' , 它们分别为 AB 与 $A'B'$ 的中点。这样, 如果从两个标记处发出的光信号同时到达观察者的时钟, 就意味着两个闪电击中参考系的事件是同时的。或者, 如果两个标记处的时钟在闪电留下该标记时具有相同的读数, 就说两个事件是同时的。如果从两个标记处发生的光信号到达其中点 (O 和 O') 有早有迟, 或者两个标记处的时钟在闪电留下该标记时有不同的读数, 就说两个闪电不是同时的。我们考虑对 S 系的观察者来说两个闪电是同时的情形, 并设定 S' 系在向右方移动。当闪电击中 A 和 A' 的瞬时这两个点是重合的, 而且当闪电击中 B 和 B' 的瞬时这两个点也是重合的。根据假定在 S 系统中这两个事件是同时的, 所以在该瞬时 O 和 O' 也必定重合。但是, 光信号从 A 和 B 处传递到 O 需要有限的时间, 在这段时间内, O' 在向右移动 (由 (b) 到 (d))。结果, BB' 处的光信号先到达 $O'((b))$, 然后再到达 $O((c))$, 而 AA' 处的光信号则先到达 $O((c))$, 然后再到达 $O'((d))$ 。在 S 系的观察者看来这两个事件是同时的, 但在 S' 系的观察看来事件 BB' 比事件 AA' 发生得早, 不是同时的。

由此可知, “同时”是一个相对概念, 而不是绝对概念。一个参考系中在同一时间即同时但在不同地点发生的两事件, 从另一个相对于它作相对运动的参考系中看来是发生在不同时间的。与此等价的另一种说法是, 一个参考系中在同一地点但在不同时刻发生的两个事件, 从另一个相对于它作相对运动的参考系中看来是发生在不同地点的。由于所选取的参考系不同, 相对运动的不同参考系之间存在着空间与时间之间的相互变换: 时间差转化为空间差, 而空间差转变为时间差。

不难理解, 两个参考系的相对运动之所以导致同时的相对性, 是

因为光信号不能以无限大的速度传递,即是说光信号有极限速度 c 。如果光信号能以无限大的速度传递,那么不论观察者位于哪个参考系中都可以绝对地确定两事件是否同时发生。例如在图 5—34 的例子中,如果光速是无限大的,那么不论 S 和 S' 相对运动与否, O 和 O' 都可以同时收到从闪电击中的两个地方传来的光信号,因为相对运动所产生的空间差异对于以无限大的速度传递的光信号来说完全可以忽略不计。实际上,经典力学隐含着对一种不花一点时间就能传递到宇宙各处的信号的假定。相对论已告诉我们,这一假定是错误的,或者说是多余的。

人们通常用下述方式来说明光速是任何物体都永远不能达到的极限速度。在相对论中,运动物体的质量不再像牛顿力学中那样总保持为常量,而是随着速度的增加而增大的。影响运动物体质量的因子与影响“尺短时慢”的因子是一样的。一个以速度 v 运动的物体质量可表示为

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (5.49)$$

式中 m_0 为所谓“静质量”。物体的惯性随速度的增加而增加,但是随着物体速度的增大,使物体加速变得越来越困难。当 $v \rightarrow c$ 时,反抗进一步加速的阻力就变成无限大,使物体加速到以光速运动所需要的能量将达到无限大。也就是说,任何物体都不可能比光运动得更快。

既然任何物体的运动速度都不能达到无限大,根据速度公式

$$v = \frac{l}{t}, \quad t = \frac{l}{v} \quad (5.50)$$

无论位移 l 多么小,时间 t 总能取一个非零值,即是说,运动物体为通过一段空间距离,总得需要一段时间。

更一般地说,任何系统的变化都需要一段时间,一个系统的任何变化都需要时间流。传奇式的瞬时变化是永远不可能发生的。需要

指出的是,即使光速可变,或者即使光速不是极限速度,只要人们尚未发现能以无限大的速度运动的物质,那么这里的一般结论仍不失其正确性。

如果说一个系统的状态可以瞬时地变化,这就意味着系统的状态变化所需的时间为无限短,而引起状态变化的作用势为无穷大。实际上这是不可能的。若以物质系统为例,只有通过系统的某些要素的物质流或能量流的强度达到无穷大,系统内的物质或能量才能在一段无限短的时间里增加或减少一定的数量。但是,物质流或能量流的强度只能是有限量,恒不可能是无穷大量。所以,一切真实系统的变化不可能是瞬时的,即系统的变化只能在时间流中进行。因此,我们应当把一切系统都看作动态系统,或者说,应当动态地考察一切系统。

但是,上述的原则性论点并不妨碍我们在一些实际问题中静态地考察某些系统。如果系统中某一变化所持续的时间,与所研究系统的寿命相比,可以忽略不计,并且这一变化对系统的生存没有多大影响,那么就可以静态地处理这一变化,认为这一变化是不需要时间流的瞬时变化。由此产生静态系统的概念。

显然,静态只不过是动态的反面表现,静态系统只不过是动态系统的一种近似表示,或者说,在观念上静态系统被视为动态系统的退化极限。

5.5.3 时间导致变化

如在本书 4.3.3 中所述,系统的时间行为可分为时不变的和时变的。系统的时变行为又可分为可逆的和不可逆的。在可逆变化下,时间的流没有箭头,而在不可逆变化下,时间的流是有箭头的。

例如,电视屏幕上曾有这样一个广告节目:一个用玻璃制造的鱼缸里装有水和几条鱼。由于某种原因,鱼缸从台子上掉了下来摔在

地板上碎了。但是过了一会儿,地板上的玻璃碎片自动结合成原来的鱼缸,洒在地板上的水流回鱼缸,而那几条鱼也返回到鱼缸里。最后,装有水和鱼的鱼缸跳回台子上。结果,时间是流过去了,但是鱼缸的现状与过去一模一样。这是保险业的一则广告。保险业在经济活动中如何神通广大,这与本书关系并不大。我们所感兴趣的是从鱼缸到碎片、再到鱼缸的变化与时间的关系。如果把鱼缸→碎片的过程视为正过程,那么碎片→鱼缸的过程可视为逆过程。这里所发生的事件是鱼缸通过一个正过程和一个逆过程恢复为原状。与这一广告完全“等价”的是一则化妆品广告:“今年 20,明年 18”。这段广告语直截了当地表示时间是可以倒流的。就是说,一个人前年为 18 岁,今年为 20 岁,但到了明年又可回到 18 岁的状态。这些广告的吸引力就在于用这种违背常理的话语来迎合人们的心理需要。虽然每个人都知道时间不可倒流,但这些广告却给人以不妨一试的冲动。

上面所举的例子与一百多年来关于时间问题的讨论有密切关系。我们的日常生活经验向我们提供的既有可逆事件又有不可逆事件。例如,风车绕轴转动;钟摆左右摆动;洗衣机内滚筒来回间歇转动,等等。这些被看作是可逆事件。另一方面,又可观察到大量不可逆事件,例如,机器生锈报废;房屋失修倒塌;人从出生到死亡;一个王朝从兴旺到衰亡,等等。这些都是与“鱼缸→碎片”的过程相类似的正过程。但是,与“碎片→鱼缸”的过程相类似的逆过程是不可能实现的:铁锈不能复原为机器;破碎了的砖块瓦片不能复原为房屋;“返老还童,长生不死”不是痴心妄想,就是欺人之谈;一个王朝如“气数”已尽,瞬息间就会土崩瓦解,就是有回天之力的英雄也无法使之免遭溃灭。

为了研究这些现象,科学上引入了“时间反演”(或称“时间反转”)概念。通常,从过去到现在、从现在到未来的时间流称为时间正演,而相反的时间流,即从现在到过去、从未来到现在的时间流称为

时间反演。确切地说,在不改变空间坐标的情况下,把时间坐标 t 的符号改为 $-t$ 的变换,称为时间反演。在时间反演下,系统的结构与功能是否发生变化,发生什么样的变化,是很多学科共同感兴趣的问题。

迄今为止的各种系统模型(包括物理、生物、社会、经济等方面的各种系统模型)可分为两类,一类是时间反演不变的,另一类是时间反演可变的。说一个系统是时间反演不变的,是指该系统的时间行为是可逆的;相反地,说一个系统是时间反演可变的,是指该系统的时间行为是不可逆的。时间反演不变的模型以古典力学模型为典型。在古典力学中,如果轨道 $r(t)$ 是牛顿方程的解,那么轨道 $r(-t)$ 也是其解。整个运动过程就像一个单摆,周而复始,往返循环。在上面鱼缸的例子中,如果观察者在鱼缸变成碎片和碎片变成鱼缸时不在场,那么他无法根据第二次看到的鱼缸来推测其间发生过的变化。就其状态而言,这鱼缸是时间反演不变的,即

鱼缸(初态) $\rightarrow$ 碎片(中间态) $\rightarrow$ 鱼缸(初态)

如果我们用手中的时钟来度量这个过程所经历的时间流,就可知道所发生的过程实际上是

初期(鱼缸) $\rightarrow$ 中期(碎片) $\rightarrow$ 现在(鱼缸)

在整个时间间隔内,系统在经历一系列变化后返回到初态。如果正演时间为 τ_1 ,反演时间为 τ_2 ,那么所经历的总时间为 $|\tau_1| + |\tau_2|$,而不是 $\tau_1 + \tau_2 = 0$ 。

时间反演可变模型的典型是热力学第二定律。热量的自发流向是从高温物体到低温物体,物质分布的自发倾向是从高密度到低密度。要出现相反的过程,必须依靠外来作用。不难看出,正过程可以自发地进行,逆过程却不能自发地进行。把描述正过程的时间坐标 t 换成 $-t$ 而得出的逆过程,并不是正过程沿相反方向的简单重复。这种过程不具有时间反演不变性。

这里也有两种情形。其一,可称为弱的或第一类时间反演可变性,是指通过外来作用,使系统能复原为某个初始状态,在物理现象中大量存在着这种弱的时间反演可变性,其二,可称为强的或第二类时间反演可变性,是指当一个系统从一个状态演进到另一状态后,无论施加何种作用,都不可能使系统返回到第一个状态。我们在生物的老化和社会的衰落等现象中可以观察到这种强的时间反演可变性。

人们迄今为止所知道的所有宏观过程都是不可逆的,也就是说,时间箭头的存在是不可否认的客观事实。但是,微观运动,诸如原子、分子的运动,基本粒子的运动,却被认为是时间反演不变的,可逆的。这就是所谓的宏观不可逆性与微观可逆性的矛盾,因为宏观过程被认为是由微观过程组成的。这也就是所谓“可逆佯谬”的实质。为了解释“可逆佯谬”,人们作了各种努力。波尔茨曼曾引入 H 函数,证明 H 函数随时间单调减少,并找到 H 函数与熵之间的关系,证明了 H 定理正是熵增加原理的反映。根据 H 定理或熵增加原理的统计性,波尔茨曼认为,它们只说明熵增加的几率最大而没有排斥熵减少的可能,但是,宏观过程不可能是可逆的,是因为系统的熵自发减少的几率极少,可以忽略。这显然是一种无法令人满意的解释。出现的几率极少的事件决不是不可能出现的事件,而且各种事件所出现的先后次序与其出现几率是无关的。因此,不能用可逆过程的“出现几率极少”来解释宏观过程总是不可逆的原因。伯格曼(Peter Gabriel Bergmann, 1915—2002)在深入研究这个问题后明确指出:“不难证明吉布斯统计和可逆的力学定律合在一起并不导致不可逆性,不可逆性的观念必须作为一个额外的成分加进去。”

但是,不可逆性并不是宏观世界所特有,在微观世界里也存在着不可逆性。首先,原子从高能级到低能级的跃迁,是一个不可逆过程。在这个过程中,一个处于能量较高的激发态的原子,自发地发射

一个光子而过渡到能量较低的激发态或基态。相反的过程,即原子从低能级到高能级的跃迁则需要从外部吸收能量。

其次,量子力学中的薛定谔方程是否具有时间反演不变性,尚有争议。在量子力学中,将对应于时间反演 T 的状态向量 $|\psi\rangle$ 的变换写成 $|\psi'\rangle = T|\psi\rangle$,并要求概率定义在这个变换下不变,即 $|\langle\psi|\varphi\rangle| = |\langle\psi'|\varphi'\rangle|$ 。那么,根据维格纳(Eugene Paul Wigner, 1902—1995)的定理, T 可取么正或反么正算符。又设系统的能量本征值有下限,则可知 T 必须是反么正的。所谓反么正,是指 $\langle\psi'|\varphi'\rangle = \langle\psi|\varphi\rangle^*$,这意味着对于复数 α ,有 $T\alpha = \alpha^* T$ 。 T 亦可称为使波函数 $\psi(t)$ 变成 $\psi^*(-t)$ 的变换。对于势为实数的薛定谔方程来说,若 $\psi(t)$ 是方程的解,则 $\psi(-t)$ 也是其解,所以可用这种方程描述的系统是时间反演不变的。若考虑自旋,则必须进行改变自旋角动量符号的变换。例如,对于自旋为 $1/2$ 的粒子的两个成分的波函数 $\psi(t)$,时间反演应定义 $\psi(t) \rightarrow \sigma_y \psi^*(-t)$,这里 σ_y 为泡利(Wolfgang Pauli, 1900—1958)矩阵。因此,自旋取一定方向的状态,在时间反演下,就转变为与原有状态不同的状态。从这个意义上说,强磁体、反强磁体等不是时间反演不变的。 T 不像宇称 P 那样导出选择规则,但对于复数相位的确定却是不可缺少的。而且, T 是反么正的,它本身不是观测量,但是在对称性低的系统中它的效果就直接地显现出来。苏汝铿和倪光炯指出:

“我们认为,薛定谔方程并不是时间反演不变的,因为除了将 t 改成 $-t$ 外的进一步操作都是危险的,而且量子力学的路径积分形式表明,非相对论的薛定谔方程不允许时间反转,当一旦将 t 改成 $-t$,便必须同时将粒子换成反粒子(费曼规则),而这样得到的便是相对论性的方程。这实际上就是 CPT 反演不变。”^①

① 苏汝铿,倪光炯. 物理学中的时间箭头. 自然杂志,1981. (7)

再如,我们来看 CPT 定理。在量子场论中,泡利和鲁德斯(Gerhart Lüders, 1920—1995)于 1955 年分别证明了关于 CPT 变换不变性的定理,这个定理指出:物理规律在空间反演(P)、时间反演(T)和电荷共轭变换(C ,亦称正反粒子变换)的联合作用下不变。在很长一段时间内,人们认为 P 、 T 、 C 三者各自也分别守恒。到了 1956—1957 年,李政道与杨振宁以及吴健雄的工作使人们懂得了在基本粒子的弱相互作用中 P 反演不守恒(即宇称不守恒), C 反演也不守恒。到了 1964—1970 年,菲奇(Val Logsdon Fitch, 1923—)和克罗宁(James Watson Cronin, 1931—)等人发现中性长寿 K 介子衰变中 CP 不守恒,也就是 T 反演不守恒。原来,中性 K 介子分为两种,一是衰变为两个 π 介子的短寿 K_S 介子。另一是衰变为三个 π 介子的长寿 K_L 介子,但约 0.3% 的 K_L 介子则衰变为两个 π 介子。因为两个 π 介子的状态对于 CP 变换是偶数关系,三个 π 介子的状态对于 CP 变换是奇数关系,所以上述的现象表明 CP 不变性的破缺。但是至今为止,只是在 K_L^0 的衰变中观察到 CP 不变性的破缺即 T 反演不变性的破缺。

通过以上的介绍与讨论,并参考其他研究成果,可以认为:牛顿力学模型是时间反演不变的,但量子力学的薛定谔方程不是时间反演不变的;现实的物质过程,不论宏观过程还是微观过程,都有时间箭头,是不可逆的; CPT 联合反演被认为是守恒的,但是其中的各个变换或任意两个变换的联合变换都是不守恒的;一般来讲,可逆性是相对的,不可逆性是绝对的;可逆性只是不可逆性的近似表示,时间反演不变性只是时间反演可变性的反面表现和退化极限。

至于微观现象与宏观现象之间的关系,还有许多问题需要进一步研究。原则上可以认为:微观的不可逆性不可能对宏观的不可逆性没有影响,但又不能说宏观不可逆性是简单地由微观不可逆性决定的;微观的时间箭头不可能对宏观的时间箭头没有影响,但是宏观

的时间箭头并不是简单地由微观的时间箭头的叠加来决定的。重要的是,诸多微观过程的相互作用和耦合关系的总体构成宏观过程。考虑到这种相互作用和耦合关系的多样性,不难理解的是大量可逆微观过程通过相互之间的非线性关系,可以形成不可逆的宏观过程。也就是说,宏观过程的不可逆性应被理解为在宏观层次上突现的,而不是微观不可逆性的简单相加的结果。系统学的这一整体性原则将有助于物理学更进一步阐明微观物质世界和宏观物质世界中的时间箭头问题。

上面,我们主要以物理现象为例说明了时间的流必定导致系统的各种变化。不少问题尚待进一步研究,但是以往的研究已经证实而今后的研究必将继续证实:在时间流中,任何系统都要发生变化。时间流会产生一种普遍而无法抵抗的力量,在它面前,无论表面上如何稳定坚固的系统,没有一个能够持久不变。

系统的时间变化通过下列几种方式进行:

(1) 系统的各要素可能由于内部原因或外部原因而发生变化。例如,人们已认识到在物质系统中不存在不可分割的不变的物质始原,一切“基本粒子”处在不断的变化和相互转化中,因而由这些“基本粒子”组成的系统(或要素)的变化就成为理所当然的。

(2) 各要素的排列次序亦即系统的结构可能发生变化。结构的变化包括要素间排列方式的变化和排列的松紧程度的变化。

(3) 各要素活动的排列次序亦即系统的功能可能发生变化。功能的变化也包括各种活动的排列方式的变化和排列的松紧程度的变化。

(4) 系统与环境的关系可能由于系统内部原因或来自环境的原因而发生变化。其中包括系统与环境的关系形式和关系的松紧程度的变化。

由此可见,把一切系统看作时变系统是合理的,也符合人们的经

验。但是,这并不妨碍我们在一些实际问题中把某些系统当作时不变系统(或称定常系统)。这种系统,在一段时间内,其状态或(和)输入—输出关系保持基本不变,即是说,在这段时间内,这种系统不随时间发生变化。实际上,人们经常把生物、人或社会当作定常系统来研究。当然,当把一个系统当作定常系统研究时,决不能忘记这个系统在时间流中并不是真的不变。任何具体系统都要经历产生、生长、老化与死亡的变化过程。

因此,时不变只不过是时变的反面表现,定常系统只不过是时变系统的一种近似。或者说,在观念上定常系统被视为时变系统的退化极限。如用辩证法的语言来讲,任何系统都可以视为时变性和定常性的辩证统一,时变性是绝对的,而定常性是相对的。

从上可知,变化需要时间,时间导致变化。不需要时间流的系统变化和在时间流中不变的系统都是不可想象的。这就是系统历时性的含义,同时又是从系统历时性中得出的总的结论^①。

当我们把系统的历时性与系统的其他性质结合起来考虑时,可以得到许多重要的结果。例如,如果我们从历时性上考察系统的等级性和并列性,就不难理解:不同等级的系统在一定条件下可以相互转化。在有些情况下,高级系统要分解为低级系统,而在另一些情况下,高级系统要从低级系统中生成。现实世界中的系统等级是系统进化的产物,而不同等级系统在同一时间上的并存性乃是不同等级系统在永恒的系统进化系列中的继起性的结果。系统的等级性和并列性不过是对系统历时性的逻辑的补充。

① 近年来围绕“时间机器”的讨论和动物克隆的成功将进一步深化人类对时间本质和方向性的认识。

第六章 信息 与 熵

有一位科学家曾经说道:为判断一个概念是否重要,就要看人们对它发表的胡说八道有多少。如果我们用这一标准来考察当今流行的各种科学术语,就不难发现在这 100 多年来最重要的概念有两个,其一是熵,其二是信息。为弄清什么是熵,什么是信息,两者之间有什么关系,以及它们在科学技术和人类生活中的作用,许许多多的科学家耗费了他们宝贵的时间和心血,其中有克劳修斯,麦克斯韦,汤姆生(William Thomson, 1824—1907),吉布斯,波尔茨曼,爱因斯坦,布里渊(Léon Nicolas Brillouin, 1889—1969),薛定谔,香农,维纳,贝塔朗菲,普里戈金,哈肯,槌田敦,……。可以肯定,今后还会有许多科学家的名字将填写在这个序列之中。^①

在这一章,我将介绍他人关于信息与熵的各种观点,并谈谈我对信息与熵的一些观点,最后用熵概念讨论生命、社会、经济系统。

6.1 系统与信息

6.1.1 系统的三基元

16—17 世纪的科学革命不仅摧毁了中世纪经院哲学,而且推翻

^① 1985 年为纪念克劳修斯提出熵概念的 120 周年,我们搜集并译编了能反映熵概念主要发展阶段的原始论文集。朴昌根,顾国庆(译编). 熵是什么?(上,下). 上海机械学院系统工程系,1985

了亚里士多德自然哲学在科学上的统治地位。亚里士多德的固定不变的世界秩序彻底崩溃了,但是他的“四因论”却成为近代科学和现代科学的源流。

亚里士多德曾以“四因”即质料因、形式因、动力因、目的因来解释各种具体事物,认为要说明事物的生灭变化就必须揭示四种原因。一是要指出事物是由什么构成的,这叫“质料因”,例如说明铜像是由铜构成的;二是要说明事物具有什么形式结构,这叫“形式因”,例如说明铜像的形式结构;三是要说明什么力量使一定的质料取得一定的形式结构,这叫“动力因”,例如说明什么力量使铜取得像的形式而成为铜像;最后,还要说明一事物之所以形成是为了什么目的,这叫“目的因”,例如说明使铜成像是为了满足某种需要(如纪念某人)。

近代科学和现代科学以自己的方式“恢复”了亚里士多德的“四因论”。首先是牛顿把质量当作物质的一个属性。他认为质量就是物质之量。质量守恒原理无疑是整个牛顿力学的支柱。19世纪中叶后,关于自然界的能量方面的研究迅速发展起来了,人们从动能和势能的相互转化中发现机械能守恒原理,从机械能和热的相互转化中发现热功相当原理,并把能的概念推广到电磁和化学过程,提出了普遍适用于整个自然界的能量守恒原理。于是,质量守恒原理和能量守恒原理成为整个自然科学的两大支柱。研究自然界不仅要研究其物质面,而且要研究其能量面。尽管爱因斯坦在20世纪初发现质量守恒原理和能量守恒原理可合并为质能相当性原理,但是这并没有否认物质和能量仍旧是自然界的两个基本面的。

信息论、控制论以及整个系统科学的产生和发展使人们对自然的认识发生了一次实质性的转变;信息作为自然界的又一基本面出现了。正如维纳所指出:“机械大脑不能像初期唯物论者所主张的‘如同肝脏分泌胆汁’那样分泌出思想来,也不能像肌肉发出动作那

样能以能量的形式发出思想来。信息就是信息,不是物质也不是能量,不承认这一点的唯物论,在今天就不能存在下去。”^①

实际上,早在牛顿的力学模型中已经出现了亚里士多德“四因论”中的“质料因”、“动力因”和“形式因”。牛顿力学模型的一般形式为

$$x(t) = \Phi(\alpha, x(0)) \quad (6.1)$$

其中 x 表示系统的状态, α 是结构参数, Φ 表示函数关系。不难看出,系统在任一时刻的状态是其初始状态的显函数,某一时刻系统状态和初始状态的函数关系都包含着若干个结构参数,如粒子的质量、速度参数等。可知, $x(0)$ 是 $x(t)$ 的“质料因”, α 是 $x(t)$ 的“形式因”, Φ 是 $x(t)$ 的“动力因”。

在牛顿模型中没有“目的因”。整个近代科学认为“目的”不属于科学,目的性没有实在性,是外在于自然界的。随着系统科学的发展,“目的性”开始进入复杂系统研究。一种见解认为“目的性”乃是复杂系统的内在属性之一。不过,要彻底弄清这个问题,现阶段恐怕还为时过早。

我在上面所指出的是:自然界有三个基本面对,即物质、能量、信息。有人说这些是三个属性,或三种要素。不管哪一种名称最妥当,他们的意思是相同的,即认为研究自然界必须研究其中的物质、能量和信息。例如,研究人类的物质生产过程,就需要研究材料、动力、信息这三个方面。

当我们所研究的不仅仅是物质系统,而是包含各种非物质系统,或一般系统的时候,就可以得到更一般性的结论。我们已知道系统的结构是以各要素作为现实基础,同样地,系统的功能是以各要素的活动作为现实基础。但是各要素为排成秩序而形成结构,必须“知

^① 维纳 N. 控制论. 北京:科学出版社,1963. 133

道”应当排在什么位置上,而各要素的活动为排成秩序而形成功能,必须“知道”应当怎样排列。在此可引进“信息”概念,认为各要素及其活动依赖信息而形成结构与功能,进而构成作为结构与功能的统一体的系统。这样,就可用要素、活动与信息这三个概念来定义系统,那就是:

结构 = 要素 + 信息

功能 = 活动 + 信息

系统 = 要素 + 活动 + 信息

这样,我把要素、活动与信息称为一切系统的三基元。为构成系统,必须有这三个基元,缺一不可。

6.1.2 什么是信息

将要素和活动当作系统的基元,似乎不会引起什么争议,但是把信息当作系统的基元之一似乎尚未取得人们的共识。这首先是由于人们对信息的理解尚有严重分歧。因此,这里将主要讨论什么是信息。

一、信息与若干相关概念

这里,先讨论信息与消息、信号、情报、物质、能量等概念之间的关系,从中界定信息概念的使用范围。

1. 信息与消息

在讨论信息概念时,需要区分信息与消息这两个概念。在信息被用作专门术语之前,信息与消息是不加区分的。在英文中,information(信息)和 message(消息)通常是互相通用的。在中文中也是如此。在中国南唐李中的诗句“梦断美人沉信息,目穿长路倚楼台”、南宋李清照的诗句“不乞隋珠与和璧,只乞乡关新信息”中,“信息”一词表示音信、消息之义。但是自信息论问世以来人们力求严格区分信息与消息。现在,一般认为,信息是消息的内核,而消息是信息的

外壳。当一个信息作为消息传输时,传输时间可长可短,例如同样一句话,有的人说得很慢,有的人却说得很快。这样,同样是一分钟的消息,有的消息含有较多的信息量,有的却含有较少的信息量。

2. 信息与信号

信号与信息也不同。信号是消息的载体,因而也是信息的载体,而信息是信号所载荷的内容。在通信中需要把消息转变为信号,如声音信号、电信号、光信号等。信号的传输显然是物能过程。同一信息可以多种信号作为载体,而同一信号可载荷多种信息。例如,“是否”信息可用“0—1”数字表示,亦可用“正—负”电流来载荷,还可用“有一无”光通量表示。另一方面,“0—1”信号可表示“是否”、“正负”、“有无”、“正误”等多种信息。

3. 信息与情报

在某些语言(如韩语、日语)中,情报就是信息,因此“情报科学”就是信息科学。但是在中文中,情报一词通常指带有机密性质的信息,因而是信息的一个子集。因此,在中文中“科技信息”和“科技情报”、“经济信息”和“经济情报”有不同的含义。

4. 信息与物质

信息与物质的区别主要有以下两点:

第一,物质遵循质量守恒原理,一物质质量的增加须以另一物质质量的减少为代价。但是信息没有质量,不遵循守恒原理。因此,一处的信息全部或部分地传输到另一处后,原处的信息量不会因此而发生变化。例如,一位教师即使把自己的全部知识传授给学生,也不会因此而变得一无所有。

第二,信息不能以游离形式存在,它的储存和传递必须依靠物质载体,例如纸张或电脑存盘,留声片或录音带,羊皮纸或泥板。但是信息量的多寡与载体质量的大小无关。例如,据有人计算,每克刻有文字的古代楔形石板载有约 10^{-2} 比特信息,每克写有文字的纸载有

约 10^3 比特信息,每克普通录音磁带可载约 10^6 比特信息,而精致的特殊磁带可载约 10^{12} 比特信息。

5. 信息与能量

信息的传递不能没有能量,能量是传递信息的媒介,但是信息不是能量,两者的区别如下:

第一,能量遵循守恒原理,也可以相互转化,但是信息不遵循守恒原理,在传递过程中常常由于干扰而发生信息内容失真、信息量减少等现象。例如,打电话时,如果噪声很大,就无法听清楚对方的话。

第二,信息的传递需要能量,但是所传递的信息量一般来讲并不能用为传递信息所消耗的能量来度量。例如,同样一句话可用大声说出,亦可用小声说出。至于信息的含义和效用则更不能用所消耗能量来度量。

二、关于信息定义的讨论

这里,介绍几种有代表性的观点并对它们进行讨论。

1. 香农的定义

香农认为:“信息是用以消除不确定性的东西。”这是香农于1948年引入的信息定义,是在信息研究中最常见的信息定义。关于信息的这一理解实际上是直接从信息量的计算公式中得到的。消息 Y 所含有的关于信源 X 的信息量 $I(X;Y)$ 被表示为

$$I(X;Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (6.2)$$

其中 $H(X)$ 为信源 X 的熵,也就是信宿在得到信息之前所具有的关于信源 X 的随机不确定性的量, $H(X|Y)$ 是信宿在收到消息 Y 的情况下所具有的关于信源 X 的不确定性。这样,信息被定义为消除不确定性的东西。

在后来的研究中,在“不确定性”的理解上有了新的发展。其一,被消除的不确定性不仅包含随机型的不确定性,而且有其他形式的不确定性,如模糊型不确定性;其二,不确定性不仅包含语法上的不

确定性(如香农所考虑的那样),而且包含语义上的和语用上的不确定性。

尚有争议的一个基本问题是,被消除的是信源的不确定性还是信宿的不确定性。有的人强调信源的不确定性,认为信息所消除的是信源的不确定性,有的人则强调信宿的不确定性,认为信息所消除的是信宿对信源的不确定性。

但是问题并不这么简单。在信源的各种事件中究竟出现哪一个事件,这是信源本身的选择与运动过程。这个过程所消除的是信源的不确定性,例如,在掷硬币时,有两种可能性,即出现正面和反面。不管出现的是正面或反面,作为掷币过程的结果,其不确定性都要被消除。如无信源的不确定性,就没有信宿对信源的不确定性;如无信源不确定性的消除,就不可能有信宿对信源的不确定性的消除。但是,信源不确定性的消除并不等于信宿对信源的不确定性的消除。这里需要一个反映过程,即信源之消除不确定性的结果向信宿的反映。

当一个人从自己的衣兜里掏出一元钱送给另一个人时,后一个人就得到一元钱。但是通信过程并不如此。对于一个只关心货币面值的人来说,硬币是立着的还是平放的,是正面朝上还是反面朝上,都是无关紧要的。但是对于一个因某种原因(如赌博的需要)而关心朝上的是哪一面的人来说,朝上的是正面还是反面却至关重要。货币的状态本身如不与特定的信宿发生联系,就不具有什么信息。因此,离开信源的状态或存在方式,我们无法谈论信息,但是对信源的考虑又不能脱离对信宿的考虑,也就是说信源和信宿必须在统一的通信系统中加以考虑。与此同时,如不考虑信宿对信源的反映过程,也不能谈论信息,即是说如无反映也就没有信息。

这里,重要的是把反映理解为一切物质所固有的一种特性。正如列宁所说,“假定一切物质都具有在本质上跟感觉相近的特性、反

映的特性,这是合乎逻辑的。”^①也就是说,不论是人还是动物,不论是有机界还是无机界,都具有反映的特性、反映的能力。反映的普遍性依赖于相互作用的普遍性,而反映问题必须在由反映者与被反映者构成的系统中加以研究。一物因另一物的作用呈现某种内在或外在变化,持有某种痕迹的过程就是反映。反映的内容取决于被反映者,而反映的形式取决于反映者。

不过,为了避免不必要的误解而需要指出的是,虽然信息与反映有着不可分割的关系,但是决不能认为信息就是反映,或者反映就是信息。我们只是认为,信宿对信源的不确定性的消除只能通过反映过程才能实现。这里,反映过程乃是消除信源不确定性的过程转化为消除信宿对信源不确定性的过程的过程,是信源的状态或存在方式转化为信息的过程,是信宿获得关于信源的信息的过程,也就是广义的通信过程。

这里还有两个问题是值得讨论的。其一是怎样理解“一物上载有多少信息量”中的信息量。这个问题是通信工程中的问题,例如一本书、一盘磁带、一封电报所载有的信息量问题就是如此。实际上这里“信息量”一词纯粹是在技术意义上使用的,完全忽略了信息的含义和信宿的个体差异。例如,假定英语 26 个字母都是按等概率出现的,那么其中每一个字母的出现所能提供的平均信息量为 4.7 比特,并据此计算一篇文章或一本书的信息量。但是我们知道,对于一个已知其内容的人来说,这一篇文章或这本书并不能提供什么信息,其信息量为零。

其二是怎样理解“一物的信息量多少”中的信息量。首先,我们之所以能谈论某物或某系统的信息量,是因为它可视为一个信源。实际上,世界上的任何事物、任何系统都可成为信源,同与之对应的

① 列宁选集第 2 卷. 北京:人民出版社,1972. 89

信宿一起构成广义通信系统。这显然是基于相互作用和反映的普遍性。其次,一个信源(某物或某系统)的信息量,实际上是指该信源的可能最大信息熵与实际信息熵之差。当这个差值最小时,其信息量最小,当这个差值最大时,其信息量最大。当我们从某个共同的基点出发考察一系统的不确定性和确定性时,其不确定性侧面所贡献的是该系统的实际信息熵,其确定性侧面所贡献的是该系统的信息量,而该系统的可能最大信息熵可理解为信宿从中所能得到的可能最大信息量的反面表现。

2. 维纳的定义

维纳认为:“信息就是我们在适应外部世界,并把这种适应反作用于外部世界的过程中,同外部世界进行交换的内容的名称。”

维纳把人与外部世界交换信息的过程看作是广义通信过程,并强调了接收信息和使用信息在人的生活中的重要性。这无疑是正确的。但是,人与外部世界所交换的内容中,不仅有信息,还有物质与能量。物质和能量不能代替信息,而信息也不能代替物质和能量。

此外,为了强调信息的普适性,还有必要指出:在对象世界中,存在着各种类型的信息,而信息的各种类型甚至可表示为信息的不同层次即信息的层次性。信息的层次性取决于反映的层次性,而反映的层次性依赖于反映者物质结构的层次性。最简单的反映形式是无机界的反应性,如一物对另一物的反作用、化学反应等。较高级的反映形式是生物体的应激性。生物体又有一系列层次,最简单的是单细胞生物,其次是具有特殊感觉细胞、神经细胞的生物,后来出现具有神经系统的生物,它们具有反射能力。最高级的反映形式是人的能动性,它以大脑为物质承担者,以人的意志为主要标志。

与反映的三个层次相对应的是信息的三个层次,那就是无机界信息、生物信息和人脑信息。无机界信息具有直接性,依赖于反映者与被反映者的直接作用。生物信息具有独立性,通过遗传可保存下

来,并使生物适应环境。人脑信息具有能动性,它不仅可以模写外部世界,而且可以能动地加工和改造反映结果,还可以把人的知识以波普尔所说的客观知识(即故事、科学理论等)的形式加以贮存和代代相传。当然,不同层次的信息形式不是绝对分立、毫无联系的,而是信息形式发展过程中的不同层次。较高层次的信息形式是在较低层次的信息形式基础上发展起来的。所以,不同层次的信息形式之间的区别是相对的。例如,动物语言和人类语言有着本质的差别,但毕竟还有着许多类似之处。

3. 艾什比的定义

艾什比于1956年提出“‘变异度’这一概念,即信息论中所讲‘信息’这一概念”。^①他认为,“信息就是变异度”。所谓变异度,是指在给定的一组元素集合中不同元素的个数,还可由元素的数目以2为底的对数表示之。例如,当某一集合只包含同一类元素时,其变异度为0。若含三种不同元素,则其变异度为3。

艾什比的这一解释给人们造成了这样的印象,即信宿对于确定消息集合中的元素个数及其概率测度不起作用,一个集合的变异度只是该集合的内在属性。这是一种误解,他认为:“一个集合中所含不同元素的个数,并不是集合本身的内在属性,如要好好确定一个集合里所含不同元素的个数,必须首先规定观察者是什么人,他有什么样的分辨能力。”^②因此,艾什比的变异度不能简单地理解为单纯地由信源本身元素的差异决定的东西。

但是,把信息理解为变异度还是不妥的。实际上,我们不难证明,当一个信源的变异度用以2为底的对数表示时,就等于其信源熵,而我们在上面已说明了一个信源的香农熵不能直接地理解为它

① 艾什比控制论导论. 北京:科学出版社,1965. 152

② 同上书,123

的信息量。

基于信息即变异度的理解后来发展出了一些新的说法,例如“信息就是差异”,“信息是物质、能量的时空不均匀性的表现”,等等。不难看出,对信息的这种理解无法确切地说明什么是信息。当电视台播放电视图像、广播电台播放广播节目时,所发射的电磁波(伴随一定的能量)有着时间、空间上的一系列的不均匀性。由于这种不均匀性,我们才能从电视机的荧光屏上看到各种图像,才能从电视机或收音机中听到各种声音,从而得到各种信息。但是,这些物质和能量在时空上的不均匀分布仅仅起着信息载体的作用,因而不能说是信息本身。

4. 信息即组织程度的度量或负熵

维纳曾指出:“正如熵是无组织程度的度量一样,消息集合所包含的信息就是组织程度的度量。事实上,完全可以将消息所包含的信息解释为负熵。”^①

对于信息的这种理解是香农、维纳和布里渊所共有的,也是一种非常流行的观点。维纳早在 1948 年已经阐述过这一观点。如果我们所考虑的只是信号波形的组织性问题,不考虑信息的含义因素和价值因素,那么在一定意义上将信息量理解为组织程度的度量是可理解的。但是,维纳的这一段话中确实存在着许多有待进一步研究的问题。

第一,熵(维纳在这里显然是指统计力学熵)能否看作系统无组织程度的量度,尚无定论。我认为这是一个似是而非的观点,对此将在本章第 2 节详细讨论。

第二,信息量取决于被消除的不确定性,而组织化程度是系统结构的特征。为了说明信息是系统组织化程度的度量,首先必须说明不确定性的消除意味着组织化。但是,很难认为这是个正确的结论。例如,一个信源由 a, b, c, d 四个事件组成,当各事件出现的几率相等

① 维纳 N. 控制论与社会. 北京:商务印书馆,1978. 12

时,该信源的信息熵最大,从而使某一事件(如 a)的出现所能消除的不确定性最大,进而使信宿能得到最多的信息。如果认为不确定性的消除即组织性的提高,那么当 a 出现时,该信源的组织性应达到最大。但是,我们实在难以想象“组织性”一词在这里究竟意味着什么。实际上,信源不确定性的消除并不是组织过程,而是选择过程。另一方面,对一个系统来说,某种信息的输入有可能改变其组织性,但是组织性是否提高决不能一概而论。例如,当老师宣布“下课”,连长向正在操练的士兵宣布“解散”,或会议主席宣布“休会”的时候,这些信息的目的就是破坏系统的原有组织性。

第三,信息即负熵的观点也是不科学的,对此亦将在本章第2节详细讨论。

6.1.3 信息的度量

从上可知:信息是可以消除信宿对信源的不确定性的东西,因此信息的度量问题就转化为不确定性的度量问题,需要考虑三种不确定性,即语法不确定性、语义不确定性和语用不确定性。与之对应的就是所谓语法信息、语义信息和语用信息。这里,“语法”、“语用”、“语义”这些概念显然是从语言学中借用的。语法信息是指构成信息的各要素之间的结合方式,语义信息是指信息的含义(意义),而语用信息是指信息的价值即实效性。下面,我们分别讨论这三种信息的度量,也就是说从这三个方面讨论信息的度量问题。

一、语法信息的度量

语法信息还可分为概率信息、偶发信息、确定信息和模糊信息等。这里我们只介绍概率信息的度量问题。概率信息所消除的是信宿对信源的统计不确定性,可用信宿得到信息之前的信息熵与得到信息之后的信息熵之差来表示。

那么,从香农提出的信源熵的公式,见式(1.3),容易得出一个消

息的统计信息量为

$$\begin{aligned}
 I &= H_1 - H_2 \\
 &= -K \sum p_{1i} \log p_{1i} - (-K \sum p_{2j} \log p_{2j}) \\
 &= K \left(\sum p_{2j} \log p_{2j} - \sum p_{1i} \log p_{1i} \right) \quad (6.3)
 \end{aligned}$$

这里, K 为正常数, 依所选用的单位而定, 而信息量的单位则由对数的底而定。当对数底为 2 时, 信息量单位称为二进单位, 即比特 (Bit, 系 Binary Digit 的缩写); 当对数底为 e 时, 称为自然单位, 即奈特 (Nat, 系 Natural Digit 的缩写); 当对数底为 10 时, 称为笛特 (Det, 系 Decimal Digit 的缩写)。在不同的场合可选用不同的单位, 而不同的单位之间有简单的换算关系。当对数底为 2 时, K 取 1。

当所考虑的事件为等概率时, 有

$$\begin{aligned}
 p_{21} &= p_{22} = \cdots = p_{2j} = \cdots = P_2 \\
 p_{11} &= p_{12} = \cdots = p_{1i} = \cdots = P_1
 \end{aligned}$$

因此,

$$\begin{aligned}
 I &= K(\log P_2 - \log P_1) \\
 &= K \log \frac{P_2}{P_1} \quad (6.4)
 \end{aligned}$$

例如, 甲掷一个骰子, 让乙猜测其结果。骰子各侧面的点数为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 每个点数出现的几率皆为 $1/6$ 。因此, 甲掷了骰子后, 乙正确猜测的几率是 $1/6$ 。

当甲告诉乙, 结果是偶数, 那么, $P_1 = 1/6$, $P_2 = 1/3$, 这个消息所传递的信息量为

$$I = K \log \left[\frac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{6}} \right] = K \log 2$$

当甲告诉乙, 结果是偶数, 但不是 4, 那么, $P_1 = \frac{1}{6}$, $P_2 = \frac{1}{2}$, 这个

消息所传递的信息量为

$$I = K \log \left\{ \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{6}} \right\} = K \log 3$$

当甲告诉乙,结果不是 4,那么, $P_1 = \frac{1}{6}$, $P_2 = \frac{1}{5}$,这个消息所传递的信息量为

$$I = K \log \left\{ \frac{\frac{1}{5}}{\frac{1}{6}} \right\} = K \log \frac{6}{5}$$

如果甲告诉乙,结果是某个数字,那么, $P_1 = 1/6$, $P_2 = 1$,这个消息所传递的信息量为

$$I = K \log \left\{ \frac{1}{\frac{1}{6}} \right\} = K \log 6$$

从上面的最后一个情形即可看出,当信宿对信源的不确定性完全被消除时,信宿所得到的信息量等于信源的信息熵。也就是说,当信源熵为

$$H = -K \sum p_i \log p_i \quad (6.5)$$

并且所传递的消息完全消除了信宿对信源的不确定性,那么这个消息的信息量为

$$I = -K \sum p_i \log p_i = H \quad (6.6)$$

二、语义信息的度量

各种信息都有其特定的含义,以此消除语义上的不确定性。例如,一句话、一种手势、一种表情都有其特定含义;人的某种动作、蜜蜂的舞蹈方式、某种频率的辐射都有其特定的意义。与此有关的信息自然就含有特定的意义。当信宿得到某种信息时,就可以消除这

种语义上的不确定性。为了度量语义信息,卡尔纳普(Rudolf Carnap, 1891—1970)、巴尔-希列尔(Yehoshua Bar-Hillel, 1915—1975)等人作了一些努力,但是至今为止,语义信息的度量问题尚未得到解决。实际上,能否找到一种普适测度来度量语义信息还是一个悬而未决的问题。

不过,人们似乎在一些最基本的问题上取得了共识。一般认为,信息量相同的几种信息,其意义却可以完全不同或很不相同。例如,有人发出“啊”的声音。如果其频率不变,只是发出一个恒定持续的声音“啊——”,则没有什么含义。当音调有变化时,就会含有某种意义。“啊↓”表示惊叹之义,“啊↑”表示疑惑之义,“啊~”表示恍然大悟之义。同样几个“啊”,它们的信息量相等,但它们的意义却不同。

语义信息的度量问题不仅涉及如何度量信息含义的问题,而且涉及如何度量信息接收者对信息意义的理解程度的问题。此外,需要指出的是,对于语义信息来说,一个最基本的问题是如何判断语义的逻辑真实性的问题。

三、语用信息的度量

在一个信源中某个事件的出现有其特定概率,也有其特定意义,同时还有它对信宿的效用即价值。信宿对信源的统计不确定性与语义不确定性的消除并不等于信息对信宿效用上的不确定性的消除。语用信息的度量问题也就是如何度量信息对信宿的实效性即价值的问题。

特定信息的价值不仅与该信息的特性有关,而且与信宿有关。同样的信息,在不同的时间、地点和条件下,对于相同的信宿有不同的价值,而且在相同的时间、地点和条件下,对于不同的信宿有不同的价值。例如,“李某死了”这样一个消息对于其亲属、朋友和不相识的人显然具有不同的价值。该消息对于某个朋友所产生的效用又因该朋

友的状况不同而不同。又如,信息的时效性也是一个非常重要的问题。信息价值是时间的函数。及时的信息可以产生巨大效用,具有重大价值,而过时的信息可能毫无价值。在战争中交战双方竭尽全力搜集对方情报,是因为能否及时获取有关情报,直接关系到战争的胜败。

贝里斯(M. Belis)和高艾斯(S. Guiasu)发展了一种有效信息理论。他们认为,一个信息能消除两种不确定性,其一是只与概率相联系的不确定性,称为量的不确定性,其二是与效用权重相联系的不确定性,称为质的不确定性。与此相对应,存在着量的信息与质的信息之分。这样,他们试图给出量质统一的信息测度。为此,他们为香农信息熵公式引入一个效用权重,提出了加权熵公式。

考虑一个信源 X , 它有 n 种可能事件, 即 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 各事件的出现概率为 $p_1, p_2, \dots, p_n$, 而各事件的效用权重为 $w_1, w_2, \dots, w_n$, 其中 $w_n \geq 0$, 则定义该信源的加权熵为

$$\begin{aligned} H(w_1, w_2, \dots, w_n; p_1, p_2, \dots, p_n) \\ = -K \sum_{i=1}^n w_i p_i \log p_i \end{aligned} \quad (6.7)$$

当 p_i 与 w_i 相互独立并且这个加权熵全被消除时, 信宿所得到的有效信息量为

$$\begin{aligned} I(w_1, w_2, \dots, w_n; p_1, p_2, \dots, p_n) \\ = -K \sum_{i=1}^n w_i p_i \log p_i \end{aligned} \quad (6.8)$$

这样, 引入效用权重的加权熵和有效信息量的公式, 在一定程度上可以度量信息对信宿的效用或价值, 而香农信息熵和信息量公式就成为加权熵与有效信息公式的特殊情况。

但是, 如何确定效用权重系数是一个十分困难的问题, 而这个问题直接涉及信息效用的度量。此外, 效用权重系数的分配问题与事件出现的概率之间的关系也无法简单地确定。一个概率很小的事件

或许具有非常大的效用,但也可能只有很小的效用。

至今为止,人们虽然对语用信息的度量问题作了各种研究,但是还没有一种较成熟的理论。有关情况可从朱马里(G. Jumarie)、约维茨(M. C. Yovits)、阿科夫、库尔巴克(Solomon Kullback, 1903—1994)等人的研究成果中了解。

6.2 系统与熵

6.2.1 熵的简史

在前面的讨论中,我们已多次使用了“熵”一词。不过,众所周知,熵概念最早是在热力学领域使用的。在介绍各种熵的内容之前,先简要地回顾一下熵的历程^①。

一、问题的提出

在 19 世纪 20 年代,当法国科学家拉普拉斯(Pierre Simon de Laplace, 1749—1827)和他几乎所有的伙伴们都在研究天文现象中显示他们自己的才华时,少数科学家和工程师们却把注意力集中在与人类日常生活有更密切关系的“小事”上。卡诺(Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796—1832)就是其中的一个人。

1824 年卡诺在“关于热动力以及热动力机构的考察”一文中,从理论上系统地分析了蒸汽机的热功转换过程。他虽然认为永动机是不可能的,但仍坚持热素说的观点,认为热素是不生不灭的^②。因此,蒸

① 小野周,植田敦,室田武,八木江里(编). 热学第二法则の展開. 东京:朝倉書店, 1990. 69—95. 132—147; 朴昌根等(译编). 熵是什么? (上,下), 1985.

② 需要指出的是卡诺并不像有些人所说的那样至死坚持热素说。他于 1832 年去世,只有 36 岁。从他死后遗留的笔记本中得知,他认为动力的消耗产生热,而热的消耗产生动力,并给出热功当量的正确数值。但是,他的这一笔记本直到他死后 40 多年谁都没有见过,因此它对物理学的发展并没有产生过实际影响。

汽机之所以能产生动力,不是因为热素的消耗,而是因为热素从热物体到冷物体的传递。这一原理不仅适用于蒸汽机,而且适用于用热驱动的一切机构。可见,他对热机的考察完全等于对水力机构的考察。在水力机构中,水从高处流到低处而产生动力,但水量保持不变。

他考察现在被称为卡诺循环的循环过程,并根据永动机是不可能制造的原理,提出了卡诺定理:“热动力与为取得它所需的工作物质无关。它的量只取决于热素在其中传递的二个物体的温度。”他还发现,就一定量的热而言,即使所下降的温差相等,在低温情况下可产生比在高温情况下更多的动力。他又认为:在热机循环中,不可能将热完全转化为功,一部分热必定从锅炉传递到冷凝器。这意味着锅炉的温度必须比冷凝器的温度高;即使锅炉温度再高,如果外界温度与之一样,该热机还是无法做功。还有一点是值得指出的:卡诺发现,热机为了持续地生产动力,热机内部必须有工作物质的循环。

卡诺定理虽然被视为现代热理论的基础,但是从现代观点看他的推理过程,就存在着两个错误,其一是认为热素不生不灭,其二是认为气体的定容比热只与体积有关,当压力增大时比热就减少。由于这两个错误相互抵消,他最终得出了正确的结论。

卡诺的论文曾于 1824 年刊印,并在巴黎科学院发表过,但是被埋没了整整 10 年。1834 年工程师克拉珀龙(Benoit Paul Emile Clapeyron, 1799—1864)注意到卡诺的论文,并写了“论热动力”一文。在这篇论文中,克拉珀龙首次使用 $P-V$ 图,并试图确定卡诺函数的倒数。这里,卡诺函数是指热机效率与两个热源温差之间的比例常数。克拉珀龙的论文也没有受到多大重视,但是 1837 年被译成英文,1843 年被译成德文。

1843 年汤姆生读了克拉珀龙论文的英译文。到了 1848 年,汤姆生终于读到卡诺的论文,并运用卡诺循环创立了热力学中的绝对温标。

另一方面,德国物理学家迈尔(Julius Robert von Mayer, 1814—1878)、英国物理学家焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)与丹麦工程师柯尔丁于 1842 年,通过各自的途径,发现了能量守恒与转化定律,而德国物理学家赫尔姆霍茨(Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, 1821—1894)于 1847 年发表的“论力的守恒”一文中对此定律作了系统阐述。焦耳通过 1845 年至 1847 年间的实验,准确地测定了热功当量,证明一定量的功可转化为一定量的热。

汤姆生支持了焦耳的研究结果。但是,卡诺的热理论建立在热素说基础上,认为热是不生不灭的。汤姆生发现了卡诺与焦耳之间的深刻矛盾,并为之苦恼。他把这一情况告诉了德国物理学家克劳修斯。

二、熵概念的提出

作为一个物理学家,克劳修斯最初感兴趣的是光学领域。汤姆生的介绍使克劳修斯开始把注意力转向热力学领域。1850 年他发表了热力学方面的第一篇论文,题为“论热动力与从热理论导出的若干定律”。

在这篇论文的第一部分他首次给出热力学第一定律的数学表达式,在第二部分主要论述热力学第二定律。他首先指出以热素说为基础的卡诺的热机理论与由焦耳等人代表的热运动论之间存在着矛盾。接着,他介绍 1849 年汤姆生为解决这一矛盾而撰写的论文,指出其中关于卡诺理论的评价是不足的。然后,他阐述了自己的观点。他接受焦耳的实验结果和焦耳等人关于“热是一种运动”的观点,认为热机消耗从高温热源得到的一部分热而做功,剩下的部分则传递到低温热源。同时,他指出:如果抛弃“热量守恒”的观点,认为被消耗的热相当于所做的功,那么,卡诺热理论的结论还是依然成立的,因此热机效率只取决于高温热源与低温热源之间的温差。他以“如不耗功,就不能从低温物体向高温物体供热”的命题为根据。实际上这就是当时克劳修斯对热力学第二定律的表述。

在他的这篇论文中,克劳修斯所考察的是可逆过程。考察不可逆过程性质的是他在热力学领域的第四篇论文,即 1854 年的“论热的机械理论第二定律的修正形式”。他把热力学第一定律称为“热与功等价性定律”,第二定律称为“转变当量定律”。他认为在循环过程中存在着两种转变。第一种转变为:①功转变为热,②热转变为功;第二种转变为:③热从高温物体传至低温物体,④热从低温物体传至高温物体。他进而把①与③称为正的转变,②与④称为负的转变。为了讨论这些转变过程,引入转变当量,设定在正转变中转变当量取正值,在负转变中转变当量取负值。这样,当用

$$N = \int dQ/T \quad (6.9)$$

表示全部转变当量之和时,在可逆的循环过程中,有 $N=0$ 。

然后,他考虑不可逆循环过程。他先设定,不论可逆或不可逆,“在任意循环过程中,所有转变当量的代数和都取正值”,作为其极限情况,在可逆过程中,有 $N=0$ 。他以对不可逆的热现象的观察作为其根据。例如,在热传导中,热从高温一侧传至低温一侧,但不做功,因此剩下的只是③的转变当量。当由于摩擦生热而功变成热,但热不传递时,只有①的转变当量。他把这种正转变称为非补偿转换。这样,他认为在可逆过程中产生补偿热,而在不可逆过程中产生非补偿热。克劳修斯实际上已指出了不可逆过程应当用不等式来描述,但还没有给出数学表达式。

1862 年克劳修斯用不等式表示了热力学第二定律,而 1865 年在热力学方面的第九篇论文即“关于热的机械理论基本方程的各种方便形式”一文中给出了如今人们熟知的表达式:

$$\int dQ/T \leq 0 \quad (6.10)$$

其中等号适于可逆过程,不等号用于不可逆过程,以从热源吸收的热为正。并在可逆过程中,给出

$$dS = dQ/T \quad (6.11)$$

$$S = S_0 + \int dQ/T \quad (6.12)$$

他把 S 称为“转变含量”或熵^①。他写道：“如果我们想用专门的名词来表示 S ，那么我们可以说……它是物体的转变含量。但是我认为更好的是，把这个在科学上如此重要的量的名称取自于古老的语言……，我建议根据希腊语 $\tauροπη$ ，即转变，把量 S 称为物体的熵(Entropie)。我有意把该词拼为 Entropie，以便与 Energie(能)尽可能相似，因为这两个词所表示的量，在物理上都具有重要意义，以致在名称上也相似，我认为是恰当的。”

但是，我们不能说当时克劳修斯已经充分重视了不可逆过程。1866 年他在作为上述第九篇论文的附录发表的论文中只讨论了可逆过程，而在 1871 年的论文中也只讨论了仅限于可逆过程的第二定律与力学原理之间的关系。这也从一个侧面反映了当时他还没有摆脱机械论世界观。不过，他的第九篇论文还是以下述两句话表达了所谓“宇宙基本原理”：

- (1) 宇宙的能量是常数。
- (2) 宇宙的熵趋于一个极大值。

三、熵概念的多样化

我们知道，在科学界现在有各种各样的熵。这就是熵概念的多样化。不同的熵概念不仅其使用领域不同，而且其意义也不尽相同。熵概念的多样化始于对热力学熵的统计解释。在此，我们从统计力学熵概念的形成过程开始，简要地介绍各种熵概念的形成过程。^②

① 克劳修斯所引入的 Entropie 一词于 1923 年由物理学家胡刚复先生译成“熵”，表示它与“火”(热)有关，由热量与温度之“商”来度量。

② 朴昌根. 熵的过去、现在与未来. 兰州: 全国第二届熵与交叉科学研讨会, 1989; 槌田敦. 热学外论. 东京: 朝倉書店, 1992. 34—53

1. 统计力学熵概念的提出

古希腊的哲学家们曾经认为物质是由原子组成的,但是中世纪的经院哲学家们似乎都忘记了古代的原于论。到了 17 世纪,伊壁鸠鲁(Epikouros,前 341—前 270)的原于论由法国科学家伽桑狄(Pierre Gassendi, 1592—1655)恢复,后由英国科学家波义耳(Robert Boyle, 1627—1691)和牛顿继承和发展。

到了 18 世纪 20 年代,瑞士科学家伯努利(Daniel Bernoulli, 1700—1782)认为气体中的分子处在不断的运动中,建立了有名的公式 $pV = (2/3)E$,其中 p 为气体压力, V 为体积, E 为能量。当时,他假定所有分子以相同速度运动。

到了 19 世纪,克劳修斯首次提出气体的分子速度可以不相同的观点。考虑到以不同速度运动的各个分子为研究对象难以建立气体理论,他提出了平均平方速度或平均动能的概念。但是他未能发展这一见解。

1859 年英国物理学家麦克斯韦最早把概率概念引入物理学。他认为气体分子进行无规则运动,并提出了分子运动的麦克斯韦速度分布定律。它表明,对一种气体来说,当处于平衡时,速度为 v 的分子的数目与 $-\beta v^2$ 的指数函数成正比,其中 β 与 $1/T$ 成正比。但是,麦克斯韦的分布律当时并未受到人们的重视。1871 年他发表《热理论》一书,整理了气体分子运动论的基本概念。在那本书中,他阐述了速度分布定律和平均自由程概念,后一概念他是从克劳修斯 1857 年和 1858 年的论文中得到启发而提出来的。在那些论文中,克劳修斯曾试图阐明自由程的物理意义。有名的麦克斯韦妖也出现在《热理论》一书中^①。

^① 人们对麦克斯韦妖作过大量的讨论。在本书中,我对麦克斯韦妖不作任何讨论。我认为,这个问题虽然讨论得很多,但是实则没有多少讨论价值,并且问题已经得到了解决。

在麦克斯韦影响下,波尔茨曼也把气体作为分子的集合来研究。他用概率论考察气体分子之间的碰撞现象,研究了稀薄气体的分布函数 $f(v, t)$ 。 f 与在时刻 t 时速度为 v 的分子的数目成比例。1872 年他在“关于气体分子热平衡的进一步研究”一文中指出 f 的变化遵从被称为波尔茨曼方程的微积分方程。该方程表示,无论从何种状态出发, f 都趋近麦克斯韦分布,也就是现在人们所说的麦克斯韦-波尔茨曼分布。这时,波尔茨曼引入 H 函数即 $H = \int dv f \ln f$, 提出了 H 定理。该定理表示, H 函数随时间单调减小,最终达到一个定值,并有 f 取麦克斯韦分布。

接着,波尔茨曼在 1877 年“论热力学第二定律与热平衡定理的概率论计算之间的关系”一文中给出了对热力学熵与第二定律的统计解释。他认为,当气体处在麦克斯韦分布时, $-kH$ 即为气体的熵。也就是说,当气体处在均匀分布时,系统微观状态总数(当时他称之为“置换度”)的对数乘以一个常数(即波尔茨曼常数)即为该系统的熵。于是,克劳修斯的熵增加原理就被表示为“物体体系总是从不可几状态向可几状态迁移”,“最终将达到最可几的状态即热平衡状态”。

统计力学熵的现代形式 $S = k \ln W$ 是普朗克于 1906 年给出的,其中 W 表示热平衡状态下的热力学几率。

2. 信息熵概念的提出

统计力学熵是对热力学熵的一种解释,因此统计力学熵是用来解释热力学系统的。熵概念之冲出物理学领域,进入非物理学领域,是香农开的先河。

前面已讲到,香农于 1948 年引入了“信源熵”概念,来表示信源的不确定性。在信息研究中香农在导出表示信源不确定性的函数之后,曾为如何称呼这个函数而苦恼。他求教于冯·诺伊曼。冯·诺伊曼回答说,应当称之为“熵”,因为:第一,这个函数已在热力学(实

际上应该说是统计力学)中称为熵;第二,多数人并不知道熵究竟是什么,如用这个名称,会在辩论中居于有利地位。

香农采纳了冯·诺伊曼的意见。他把信源不确定性的量度称为“信源熵”。五年之后即1953年,苏联数学家辛钦(Aleksandr Yakovlevich Khinchin, 1894—1959)引入了“信息熵”概念,从此信息熵概念在全世界广泛流行。不仅如此,那以后就是在那些与统计力学和信息论没有直接关系的领域里,只要有不确定的事件,人们就喜欢用“概率分布的熵”来讨论这些事件,这就使熵概念更加多样化。

3. 数学熵概念的提出

在统计力学中,熵被解释为热力学系统微观状态的统计不确定性;在信息论中,熵被定义为消息集合中的统计不确定性。作为数学的抽象,对特定数学系统考虑特定的“概率分布的不确定性”,产生了测度熵和拓扑熵,进而作为其一般化又出现了广义熵。

1958年苏联数学家柯尔莫果洛夫在香农信源熵的基础上将熵概念引入到动力系统的遍历理论,提出了测度熵概念。1959年西奈(Y. G. Sinai, 1935—)改进定义得到了遍历理论中常用的测度熵。在概率测度空间上,已知一个变量在其定义域的某个划分中所在的位置,那么其保测变换在值域某个划分中位置的不确定性就被定义为测度熵。它是一个条件概率在各种不同划分下的上界。测度熵度量了同类保测变换,区分了不同类的保测变换。

1965年埃德勒(R. L. Adler)、肯海因(A. G. Konheim)和麦克安德卢(M. H. McAndrew)在测度熵的启示下,对紧致拓扑空间引入了拓扑熵概念。1970年包恩(R. Bown)等又对拓扑熵作了进一步的阐述。这里,用开覆盖代替划分,用极小覆盖的个数平均值代替条件概率,用紧致拓扑空间代替概率测度空间,由此就可定义紧致拓扑空间上的连续影射的拓扑熵。那就是上述的有限覆盖的极小子覆盖

之数平均值的极限的上界。如果说测度熵所表示的是保测变换下的一个不变量,那么拓扑熵所表示的是拓扑变换的一个不变量。同类的拓扑变换具有相同的拓扑熵。

雷尼(Alfréd Rényi, 1921—1970)于 20 世纪 60 年代引入的广义熵也是值得重视的,我们将在本章第 3 节详细介绍并进行讨论。

此外,在数学领域人们还提出了其他意义上的熵,如德卢卡(Aldo de Luca)和特米尼(Settimo Termini)于 1972 年提出的模糊熵。

4. 其他熵概念的提出

在熵概念的大家族里,除了常见的上述几种熵之外,还有其他多种熵概念,例如物理场熵、社会熵、经济熵、精神熵、性熵等。在有的论著中,“熵”概念并没有确切的含义,只是在比喻的意义上使用的。在有的情况下,要不要把系统的某个量称为“熵”,为什么称为“熵”,尚存在着许多值得讨论之处。

例如,一些学者在研究收入分布的不平等程度时,引入了“收入分布熵”。设劳动者总数为 D ,收入层次为 r ,属于第 j 层次的人数为 $d_j (j = 1, 2, \dots, r)$,将收入分布的不平等程度表示为

$$-\sum_{j=1}^r \frac{d_j}{D} \log \frac{d_j}{D}; \sum_{j=1}^r d_j = D$$

并称之为“收入分布熵”。在历史上为了表示收入分布的不平等程度人们曾提出过各种方案,而这里所介绍的“收入分布熵”能否表示收入分布的不平等程度,还有许多问题需要进一步探索。

6.2.2 什么是熵

熵的历史表明,熵概念与熵理论所取得的成果与它们所造成的混乱成正比,熵概念与熵理论每取得一个成果就产生十倍的混乱。在讨论熵研究中出现的各种问题之前,我先介绍几种熵概念的含义。

一、热力学熵

在热力学中为表示物体状态使用各种状态量,如压力、体积、温度、内能、熵、混合物中各成分的浓度等。

热力学第一定律指出

$$\Delta U = Q + W \quad (6.13)$$

其中 U 为内能, Q 为流入的热, W 为施加的功。这就是能量守恒定律。

所谓熵,是表示热力学系统状态变化方向的状态量,可理解为“表示扩散程度的物理量”^①。设一孤立系初态熵为 S_0 ,终态熵为 S_f ,变化过程中的熵为 S ,则

$$S_f \geq S \geq S_0 \quad (6.14)$$

亦可写成

$$\Delta S_f \geq \Delta S \geq 0 \quad (6.15)$$

上述两式就表示热力学第二定律。它表示:一个孤立系状态变化的方向就是熵增加的方向;熵的增加有终点,即热力学平衡态;熵是物和热的属性,不能以游离形式存在。

当一个系统从外界吸收热 Q 时,它的熵就发生变化:

$$\Delta S \geq Q/T \quad (6.16)$$

其中 T 为热的出入口处的温度。当热的流入和流出是在充分接近热平衡的条件下进行时,上式取等号。因此,求其积分,即可求得一系统的绝对熵值。即是说,当冷却一物体时将 Q/T 的积分下限取为绝对零度,可求得该物体的熵为

$$S = \sum_{T=0}^T \frac{|Q_i|}{T_i} + S_0 \quad (6.17)$$

据热力学第三定律,绝对零度下物体的熵为零,因此式中的 S_0 可

① 槌田敦. 资源物理学. 朴昌根译. 上海:华东化工学院出版社,1991

消去。

熵的增加过程可分为热扩散和物扩散。热扩散是指热从高温物体(温度 T_1)向低温物体(温度 T_2)的传递。设所传递的热为 Q , 那么高温一侧的熵减少 Q/T_1 , 低温一侧的熵增加 Q/T_2 , 从而有

$$\Delta S = Q(T_1 - T_2)/T_1 T_2 > 0 \quad (6.18)$$

这表明热扩散是一个熵增加的过程。

物扩散是指高浓度物体向低浓度空间的扩散。例如, 有 n mol 理想气体, 它在真空中扩散而体积达到原来的 X 倍, 那么熵的变化量为

$$\Delta S = nR \ln X > 0 \quad (6.19)$$

其中 R 为气体常数。这里 X 大于 1, 故 $\ln X$ 为正。所以, 在物扩散中熵必定增大。用此式还可计算所谓混合熵。

这样, 不仅对于热, 而且对于物, 都可将热力学熵解释为表示扩散程度的定量指标。

如果所考虑的是开放系, 即与环境有熵的流入和流出的系统, 那么不仅要考虑作为状态量的熵, 而且要考虑作为传递量(迁移量)的熵, 也就是通常所说的熵流。在普里戈金之前, 克劳修斯、波尔茨曼、薛定谔等已考虑过作为迁移量的熵。

如果熵的传递靠的是热, 那么熵的传递量 σ 为

$$\sigma = Q/T \quad (6.20)$$

如果熵的传递靠的是物, 那么熵的传递量就等于该物的作为状态量的熵。这样, 一个开放系的作为状态量的熵的变化 ΔS 为

$$\Delta S_f \geq \Delta S \geq \sigma \quad (6.21)$$

其中 σ 表示系统与环境之间的熵流, 以熵流入系统的方向为正。这就是开放系的热力学第二定律。与孤立系不同, 开放系在达到终态时并非一定处在平衡态, 如在生命系中所看到的那样。

当然, 开放系的熵原理亦可写成

$$dS = d_i S + d_e S \quad (6.22)$$

这里 $d_i S$ 为系统内部的熵产生, $d_e S$ 为系统与环境之间的熵流。虽然 $d_i S \geq 0$, 但由于 $d_e S$ 可正可负可零, dS 亦可正可负可零。

二、统计力学熵

统计力学用统计方法研究由大量微观粒子组成的物质系统。当玻尔茨曼创立统计力学时, 他的直接目的是用大量微观粒子的运动来解释气体的热运动。但是, 在牛顿力学中, 分子、原子的运动被看作是可逆的, 而在热力学中, 宏观物体的状态变化是不可逆的。那么, 微观的可逆运动为什么会导导致不可逆的宏观运动呢? 统计力学认为, 那是由于大数定律起作用, 也就是说, 是由于宏观物体是由大量(如 10^{23} 个数量级以上)微观粒子所组成的。

设一个容器中有 1mol (分子数为 $N = 6 \times 10^{23}$) 的理想气体。其内能 U 为各分子动能之和。设 $\vec{P}_i$ 为第 i 个分子的动能, 则

$$U = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N \vec{P}_i^2 \quad (6.23)$$

另一方面, 为描述这些分子的运动, 由于一个分子的坐标和动量各有三个因子, 需要考虑 $6N$ 维相空间中的一点。其中, 满足上式的是这个相空间中的子空间。

但是, 在量子力学中, 坐标增量 Δx 与动量增量 Δp_x 之积为普朗克常数 h , 在其范围内各个状态是没有区别的, 因此相空间可分割为 h^{3N} 个微小部分。这样得到的状态就被称为微观状态。

这样, 就可计算满足式(6.23)的子空间内的微观状态的数目。设微观状态数为 W , 其对数为 F , 即

$$F = \ln W \quad (6.24)$$

在理想气体的粒子数 N 与内能 U 保持不变的情况下, 使它的体积增至原来的 X 倍, 那么微观状态数就增至

$$\Omega \rightarrow X^N W \quad (6.25)$$

因此,

$$F \rightarrow F + N \ln X \quad (6.26)$$

若考虑这个扩散过程中的熵的变化,据式(6.19),可知

$$S \rightarrow S + R \ln X \quad (6.27)$$

由于式(6.26)与(6.27)所描述的是同一个变化过程,可设定 F 与 S 之间存在着某种对应关系。但是,热力学熵 S 是可用 cal/deg 的单位来测定的物理量,而 F 是没有量纲的数,因此 F 不能与 S 直接相等。考虑到对应关系

$$\frac{S}{F} = \frac{R}{N} \quad (6.28)$$

并设 $k = R/N (= 8.31441 \times 10^7 \text{ erg} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1} \div (6 \times 10^{23})$
 $= 1.380662 \times 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1})$

则

$$S = k \ln W \quad (6.29)$$

这就是有名的波尔茨曼关系式,其中 k 为波尔茨曼常数。

式(6.29)所示的就是对热力学熵的统计解释。据此,人们认为:从微观上看,所谓熵是表示热力学系统中原子、分子运动的混乱度的一个量;熵增加原理所示的从熵小的状态向熵大的状态的自动变化,是指分子的不均匀分布自动趋向均匀分布,分子运动混乱度小的状态自动趋向混乱度大的状态,几率小的状态自动趋向几率大的状态。

这里一个重要问题是统计力学怎样解释变化的不可逆性。经典力学中的可逆性与热力学中的不可逆性是作为经验事实预先被引入的。但是统计力学中,试图从微观运动的可逆性导出宏观变化的不可逆性。统计力学并不完全否定宏观变化的可逆性,而只是说其可能性极小,近乎零,或者认为出现可逆结果所需时间“无限长”,实则不可能。例如,据波尔茨曼的计算,容积为 100ml 的容器内的两种气体,从均匀的混合状态返回到两者各自分离的状态,所需的回归时间

为 10^{10} 年以上。相比之下,宇宙的年龄大约只有 10^{10} 年即 100 亿年,因此 10 的 100 亿次幂的时间简直是无法想象的漫长岁月。也就是说,上述的回归过程实则不可能实现。

此外,在统计力学熵的理解上,也存在着不同的理解。一种意见认为统计力学熵是指式(6.24)所示的 F ,另一种意见认为是指式(6.29)所示的带有波尔茨曼常数的 S 。显然,前者不是物理量,而后者是个物理量。

三、负熵

对于谁最先引入了“负熵”概念,学者之间尚有争议。有人认为是西拉德(Leó Szilárd, 1898—1964)最先提出了“负熵”概念,而薛定谔曾说过这样的话:“熵和负熵并不是我的发明。它恰巧正好是波尔茨曼独创的论证的关键。”^①

但是,据我所知,西拉德在“论有智慧的存在物引起的热力学系统的熵减少”(1928年)一文中,虽然多次使用了“熵的减少”这样的表达方式,但并没有明确地使用过“负熵”概念。此外,似乎波尔茨曼也未曾使用过“负熵”概念。

因此,最早明确使用“负熵”一词,并试图为“负熵”给出明确定义,从而产生很大影响的还是薛定谔。他在《生命是什么》(1944年版)一书中这样做了。他虽然在该书1945年的修订版中所加进去的一段注(上面的引文出自此注)中有意把“负熵”的发明权让给波尔茨曼,但是这似乎是不公道的。

薛定谔在《生命是什么》一书中写道:

“一个生命有机体通过不可思议的能力来推迟趋向热力学平衡(死亡)的衰退。我们如何根据统计学理论来表达呢?我们在前面说过:‘以负熵为生。’就像是有机体本身吸引了一串负熵去抵消它在生

① 薛定谔. 生命是什么. 上海:上海人民出版社, 1973. 82

活中产生的熵的增加,从而使它自身维持在一个稳定的而又很低的熵的水平上。

假如 D 是无序的量度,它的倒数 $1/D$ 可以作为有序的一个直接量度。因为 $1/D$ 的对数正好是 D 的负对数,波尔茨曼的方程式可以写成这样:

$$\text{负熵} = k \log(1/D) \quad (6.30)$$

因此,‘负熵’的笨拙表达可以换成一种更好一些的说法:取负号的熵,它本身是有序的一个量度。”^①

不难看出薛定谔的“负熵”究竟是什么。顺便提一下,薛定谔当时所使用的是 negative entropy,而布里渊于 1950 年在“麦克斯韦妖不起作用:信息与熵(I)”一文中造出了缩写词 negentropy,其含义与薛定谔的完全一样^②。

四、信息熵

我们在前面已用大量篇幅讨论了信息熵和信源熵。这里,我只想简单地指出下列几点。

第一,在大量情况下,人们不加区别地使用信息熵与信源熵这两个概念。这在许多情况下是允许的。

第二,严格地讲,应当认为这两个概念并不完全一致。信源熵所指的是信源自身的不确定性,而信息熵是指信宿对信源的不确定性,也就是指在信源的事件转化为信息时由信宿考察的信源的不确定性。另外,信源熵是指信源的熵,但信息熵是指信息的熵,是指信息意义下的熵。

第三,应当区分信源熵与信息量。当一个信宿对信源的不确定性全被消除时,信源熵在量上等于信宿所得到的信息量。但是在概

① 薛定谔. 生命是什么. 上海:上海人民出版社,1973. 81

② 朴昌根等(译编). 熵是什么?(下),1985. 48

念上信源熵并非与信息量相同。

6.2.3 问题与讨论

20 世纪 80 年代后期至 90 年代初期,在中国学术界出现了熵研究的“热潮”,许多研究者热烈地讨论了与熵有关的一系列的理论问题,并且为用熵概念和熵理论实际问题作了努力^①。

下面,我将讨论熵研究中出现的一些基本问题。在下面的讨论中,为简化起见,将用 S_C 表示热力学熵, S_B 表示统计力学熵, $-S_B$ 表示负熵, H 表示信息熵。

① 具体情况简述如下:

(1) 从 1987 年起,多次召开以熵为主题的全国性专题讨论会。1987 年在新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市召开全国首届熵与交叉科学学术讨论会。1989 年在甘肃省兰州市召开全国第二届熵与交叉科学学术讨论会。1990 年在上海召开中日熵理论与应用学术讨论会,1991 年在四川省攀枝花市召开全国第三届熵与交叉科学学术讨论会。

(2) 发表的论著增多。据不完全统计,在 1980—1987 年间,中国各种期刊上发表的熵研究论文约达 200 多篇。此外,第一次熵会交流近 100 篇论文(论文集《熵与交叉科学》1988 年出版),第二次熵会交流 40 多篇论文,中日熵会交流 30 多篇论文(其中 7 篇为日本学者的论文,论文集《熵:理论与应用》1991 年出版),第三次熵会交流 100 多篇论文(论文集《熵理论的一场大辩论》1993 年出版),并且已出版了一些专著。同时,国外学者的大量论文和著作译成中文出版,其中包括 1991 年出版的《资源物理学》(日本植田敦著)一书。

(3) 投入熵研究的人员增多,他们的专业领域相当广泛。参加以上几次学术讨论会的学者人数共达 300 多人次,他们所从事的专业领域包括数学、物理学、化学、生物学、天文学、气象学、地理学、医学、系统科学、信息科学、社会科学、哲学等。

(4) 多次进行了国际学术交流。例如,日本物理学家、资源物理学创始人植田敦于 1989 年应邀来华访问,在上海机械学院组织的学术报告会和全国第二次熵与交叉科学研讨会上发表讲演,系统地介绍了资源物理学。1990 年中日熵理论与应用研讨会是国内召开的第一次以熵为主题的国际研讨会。在中日熵研究者的共同努力下那次次会议取得了圆满成功。1991 年全国第三次熵与交叉科学研讨会期间又有两名日本学者应邀出席并作了学术报告。另一方面,笔者于 1991 年应日本熵学会的邀请出席日本熵学会第 9 次学术讨论会并发表演讲,还在东京大学召开的东京熵研讨会上发表演讲并与日本学者进行了广泛的讨论。所有这些活动,促进了中日两国熵研究者之间的了解和各自的研究。

(5) 熵研究在某些问题上取得了实质性的进展。在理论上某些疑难问题已经和正在得到解决,在应用方面也取得了一些引人注目的成果。

一、热力学熵 = 统计力学熵?

在把 S_B 理解为 $S_B = k \log W$ 的前提下,人们通常认为 S_B 揭示了 S_C 的微观机制,因而是 S_C 的发展和深化,至少认为这两种熵是对热力学系统状态的两种不同描述即宏观描述(S_C)和微观描述(S_B)。

但是,不可忽视的事实是 S_C 和 S_B 之间的确存在着区别,其中有些区别是实质性的。

首先, S_C 表示物理系统自身的性质,是系统的宏观状态量,而不是某种分布的函数。因此,为了使 S_B 与 S_C 等价,波尔茨曼关系式中的 W 应该是系统的微观状态总数。但是,因为 W 是各种分布的微观状态数的总和,而一个和的对数不便运算,所以通常用最可几分布的微观状态数 $W_{\max}$ 来取代 W ,从而使对数运算变得方便。而且当微观粒子数 N 很大时,用 $W_{\max}$ 代替 W 也不会引起显著的误差。但是,这种处理使 S_B 被表示为微观状态的概率分布的函数。这种理解无论如何也不适用于 S_C 。

其次,在统计力学中,热力学熵原理所揭示的不可逆变化被看作是进行可逆的力学运动的大量分子的集体行为,从而以可逆结果的可能性之极小来解释不可逆性。但是,统计解释只能给出大量事件中某一事件出现的概率大小,却不能给出各种事件出现的时间次序,也就是说概率极小的结果也有可能较早地出现。因此,从原则上讲,统计解释不可能导出 S_C 所给出的不可逆性。此外,力学中的可逆性只是理论模型上的可逆性,是对不可逆性的一种近似处理。无论宏观世界还是微观世界就其本身而言都是不可逆的。这一点可能使物理学摆脱二难推理。但是在对热现象的统计解释已造成很大混乱的今天,强调世界本身的不可逆性是非常必要的。

第三,在用 $W_{\max}$ 代替 W 时,通常使用斯特灵 (James' Stirling, 1692—1770) 公式:

$$\log N! \approx N \log N - N + \log \sqrt{2\pi N} \quad (6.31)$$

当 $N > 100$ 时,斯特灵公式就可给出很好的近似。这就是说,只要系统的分子数略大于 100,就可用 S_B 表达式算出其“ S_B ”。但是,在这种情况下,“ S_B ”与 S_C 的等价关系就不再成立,也就无法用“ S_B ”说明系统的不可逆变化,因为对这样的系统根本无法谈论热运动与热力学熵。一个系统的分子数究竟要超出多少才能发生热运动,至今尚不清楚。一般,统计力学所考察的系统所包含的分子数为 10^{23} 数量级。因此,在由少量分子组成的系统中,虽然从形式上可算出其“ S_B ”,但它与 S_C 并没有内在的关系。这表明,我们不能用 S_B 来讨论这种系统。

第四, S_B 可用来描述系统微观状态无序程度、混乱程度。因此, S_B 与无序之间有一定程度上的联系。但是, S_C 本身与无序、混乱等概念毫无关系,它只与 T 和 Q 有关。

最后,式(6.29)所示的 S_C 与 S_B 的等价关系是基于理想气体进行理论推理而得到的结果。之后,通过大量实验、测定和计算已确认在许多种气体和其他物质中确实有 S_C 与 S_B 的等价关系。但是,无论在理论上还是在实验上尚未证明或证实对于任何情况下的任何物质都有这一等价关系。

二、物理熵与信息熵之间的关系

这里,物理熵(S_{ph})用来指 S_C 和 S_B 。在物理熵与信息熵的关系问题上,有两种极端看法。其一是认为两者根本不同,不能建立两者之间的任何关系,另一是认为两者之间存在着正相关的对应关系。

我认为 S_{ph} 和信源熵 H 之间存在着本质上的区别,但也存在着某些方面的内在联系。

首先, S_{ph} 是热力学(包括统计热力学)概念, H 是信息论概念,两者的含义是根本不同的。例如,设 p_i 是能量为 ϵ_i 的微观状态出现的几率,则 S_B 可记为

$$S_B = -k \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (6.32)$$

这显然与 H 的公式, 见式(1.3)非常类似, 惟一的区别在于两者的系数。但是, 这种区别是不容忽略的。 S_{ph} 只适用于热力学系统, 不适用于非热力学系统; S_{ph} 只适用于由大量微观粒子组成的系统, 不适用于由少数粒子组成的系统; S_{ph} 遵从熵增加原理。与之不同, H 不受上述三个方面的限制, 即是说, 它可适用于非热力学系统, 可适用于由少量粒子组成的系统, 而且不遵从熵增加原理。对于非热力学系统, 可使用 H , 但不能使用 S_{ph} 。例如, 一个句子的 H 既有意义亦可度量, 但不能谈论其 S_{ph} 。就 S_B 与 H 的表达式而言, 虽然它们在形式上非常类似, 但是 S_B 中的 k 是一个有物理意义的物理常数, 而 H 中的 k 是一个任意正数, 无物理意义, 也就是说 S_B 是个物理量, 而 H 不是物理量。

其次, 在一定范围内, S_{ph} 与 H 之间存在着某种对应关系。当我们把热力学系统当作信源时, 既可计算其 S_{ph} , 亦可计算其 H 。例如, 设一个孤立系内 N 个近独立的定域子分布在 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_i, \dots, \epsilon_m$ 能级上, 各能级的分布数为 $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_m$, 那么

$$\delta Q = \sum_i \epsilon_i dn_i = N \sum_i \epsilon_i dp_i \quad (6.33)$$

因此,

$$dS_{ph} = kNdH \quad (6.34)$$

其中

$$dH = \sum_i \epsilon_i dp_i / kT \quad (6.35)$$

亦即

$$S_{ph} = kNH \quad (6.36)$$

这样, S_{ph} 与 H 之间存在着正相关的定量关系。这时可算出 1Bit 的 H 相当于多少 S_{ph} , 即

$$1\text{Bit} = 10^{-23} \text{J/k} \quad (6.37)$$

但是, 式(6.36)所示的 S_{ph} 与 H 之间的关系和式(6.37)所示的当量关系有着严格的前提。第一, 这里所考察的是热力学系统, 它同

时被当作信源,对非热力学系统来说式(6.36)和式(6.37)都不成立;第二,被当作信源的热力学系统的各个微观状态本身被看作是信源的事件;如果被考察的热力学系统虽然被看作是一个信源,但被当作“事件”的不是各个微观状态本身,那么,也就不能使用式(6.36)和式(6.37)。这就是说,即使对被当作信源的热力学系统来说, S_{ph} 与 H 之间的当量关系也不是普适的,因为对一个热力学系统来说,其 S_{ph} 值是惟一的,但其 H 值并不惟一。 H 的计量与所论信息的信息和意义和信宿的情况等有关。

三、熵与序之间的关系

自从波尔茨曼引入 S_B 之后,熵与序之间的关系一直是一个争论不休的问题。也存在着两种极端相反的观点。其一是认为 S_B 表示一个系统的无序程度,另一是认为各种熵(S_C, S_B, H)都不能度量序,不能表示系统的无序程度。在这两种观点的阐述和争论中,可以发现各种问题,如对熵和序的理解问题,逻辑推理的合理性问题,词语的选用问题,等等。在此,我无意于详细讨论所有这些问题,只想指出下列几点:

第一,物理熵与序不是同一论域中的概念。 S_{ph} 是一个物理量,用能量单位和温度单位来表示。与此不同,序不是一个物理量,一般来讲,它与能量和温度无关。例如,英文字母的排列次序既与能量无关,也与温度无关。因此,就 S_{ph} 与序的内在含义上看, S_{ph} 是与序无关的; S_{ph} 不能度量序。

假使退一步说我们所讨论的是不同论域中的概念之间的关系,那么,这种讨论所需的一个必要前提是 S_{ph} 与序应该有明确的内涵和外延。但是,就迄今为止的讨论情况而言,所使用的 S_{ph} 是一个科学概念,但序原先是一个日常用语,在科学领域还没有明确的定义,反而有歧义性。在这种情况下讨论 S_{ph} 与序的关系,很难取得令人满意的结果。

第二, S_B 并不能直接表示热力学系统微观状态的无序程度, 但是对一个孤立系统来讲, S_B 最大的状态是最无序的微观状态。因此, 就这种系统而言, 可用 S_B 描述其微观状态的无序程度。当然, 即使在这种情况下, 也不能认为 S_B 就是系统微观无序的量度。

信息熵也不能直接表示信源的无序程度, 信息量也不是系统有序的普适测度。但是, 当信息量的计算与信息意义相结合时, 信息量可用来描述系统的有序程度。

第三, 对不同的系统来讲, 无法用其熵 (S_C, S_B, H) 值的大小来判断其有序度的大小。例如, 一块冰和一定体积气体的 S_{ph} 值可以相等, 亦可不同, 但是冰总是要比气体有序。对于同一个系统来讲, 由于熵的可加性, 整个系统的熵是各部分熵的总和, 但是系统的有序度并不具有可加性。

第四, 为了科学地定义序, 必须考虑序的层次性和内容。根据序的层次性, 可将序分成微观序、中观序和宏观序。根据序的内容, 可将序分成与概率分布有关的序和与系统模式有关的序。用 S_B 只能描述微观序, 不能描述中观序、宏观序; 用 H 可描述信源的微观序、中观序和宏观序。但是 H 也是与概率分布有关的量, 所以它也只能描述与概率分布有关的序, 不能描述与模式有关的序。两个系统即使有相等的 H 值, 其模式也可以完全不同。

四、负熵

有一种非常流行的观点, 认为: 熵表示系统无序程度, 而负熵表示系统有序程度。按照布里渊的观点, 负熵意味着信息。因此, 凡是能用 S_{ph} 和 H 加以解释的领域, 都可以用负熵加以解释。一切有序的状态都是负熵大的状态, 一切趋于有序的过程都是负熵增大的过程。

但是, 负熵概念并不是一个科学的概念, 它不仅是多余的, 而且是错误的。

如已所述,熵不是系统无序的普适量度,因此负熵也不可能是系统有序的普适量度。假如熵可以表示系统无序度,那么为表示系统有序度而引入的负熵概念就成为多余的。

实际上任何一个系统的熵(S_C, S_B, H 等)永远不能取负值。热力学第三定律、 S_C 与 S_B 的公式、 H 的表达式都表明这一点。对一个系统来说,熵流和熵变可取负值,但熵本身不能取负值。

将负熵等同于信息的观点是错误的。按照薛定谔的观点,负熵即带负号的 S_B ,而 S_B 与 H 不是同一个论域中的概念,因此 S_B 的减少不能说成是 H 的消除即信息量的增加。当然,当用 S_B 表示一个系统的熵,用 H 表示与之对应的微观状态不确定性时,信息的输入使 S_B 减少,而 S_B 的减少使信息量增大。但是 S_B 与信息之间的这种关系只是在一定条件下才成立的,而不是普遍成立的。因此,“在一个系统中,信息的增加导致熵的减少,熵的增加导致信息的减少”的观点作为一般命题并不成立,是一个似是而非的观点。

此外,有必要指出的是,当一些人跟着布里渊认为负熵即信息的时候,他们却忽略了布里渊的下列看法:他把信息分为约束信息和自由信息,前者用于可能发生的事件被视为物理系统之内部分布的场合,后者用于可能发生的事件被视为抽象的而不具特定物理意义的场合。布里渊不考虑自由信息与熵之间的关系,只讨论约束信息与熵之间的关系。但是人们常常忽略布里渊的这一限制,笼统地谈论一切(或一般)信息与负熵之间的关系。结果是错上加错。从上面 S_{ph} 与 H 之间关系的讨论中不难看出,就是对于 S_{ph} 与约束信息之间的关系而言,也不能得出负熵即信息的结论。

五、熵与复杂性

近年来,熵与复杂性的关系问题也是一个热门话题。不少学者认为熵是对系统复杂性的度量。这里,困难不仅来自对于熵的不同理解,而且来自对于复杂性的不同理解。如我们在本书第四章所看

到的那样,对于复杂性尚无统一的确切的理解。在这种情况下,用熵来讨论复杂性或用复杂性概念来讨论熵,都不会有明确的结果。

但是,有两种观点还是值得介绍的。

其一是认为熵是表示物质系统的状态的丰富程度或复杂程度的量,并记为

$$H = C \log \Omega \quad (6.38)$$

其中, H 表示熵, C 表示比例常数, Ω 表示状态数。进而把热力学熵、统计力学熵和信息熵当作式(6.38)的特例。

这一观点还进一步认为:状态个数增大就意味着熵增大,熵增大意味着系统变得更复杂。物质系统、生物系统以及社会系统都是朝向复杂程度加大,即熵自动增大的方向变化。

对这一观点的批判性意见认为:在平衡态中,系统的物理熵达到极大,也就是微观粒子的分布最均匀的状态,而这种状态并不是最复杂的状态,而是最简单的状态。仅以状态个数来表示系统复杂性是不够的。复杂性应该有更深刻的含义。

另一是用雷尼的广义熵表示系统的复杂性^①。但是,熵有阶次,系统复杂性也有层次。不同阶的熵有不同层次复杂性的具体含义,不同层次的具体复杂性与不同阶的熵相对应。

设 ϵ 是相空间的相格线度, $N(\epsilon)$ 是相格总数,则雷尼的 q 阶广义熵 R_q 记为

$$R_q = \frac{1}{1-q} \log \sum_i^{N(\epsilon)} p_i(\epsilon)^q \quad (6.39)$$

哈特莱最大熵

$$H_{\max} = \log N(\epsilon) \quad (6.40)$$

^① Qu Zhi, The Generalized Entropy & Dimension with Study of Information Principles for Qigong. 见:车宏安等(编). 熵:理论与应用. 北京:中国科学技术出版社,1991. 17—28

为 0 阶熵 R_0 , 它与系统微观状态的大数性(0 级复杂性)相对应, 表示系统状态相点均匀充满相空间等概率分布的最大分散度或无序度。

香农信息熵

$$H = - \sum_i^{N(\epsilon)} p_i(\epsilon) \log p_i(\epsilon) \quad (6.41)$$

为一阶熵 R_1 , 它与一级复杂性相对应, 表示系统状态相点不均匀不充满相空间非等概率分布的分散度或无序度。

雷尼关联熵

$$R = - \log \sum_i^{N(\epsilon)} p_i(\epsilon)^2 \quad (6.42)$$

为二阶熵 R_2 , 它与二级复杂性相对应, 表示两个相点相互无关联度。

广义熵 R_q 表示 q 个相点相互无关联、不协同程度。

这里所介绍的观点把复杂性的层次和熵的阶次联系起来, 是有积极意义的。可以认为这种理解发展了上面所述的第一种观点, 但是还不能认为这里所定义的熵能完全地描述系统复杂性。系统复杂性不仅与相空间中的分布有关, 而且与其他众多因素有关, 尤其在生物、经济、社会、思维等系统中系统复杂性不仅与其要素的空间分布有关, 而且与要素本身的各种具体特性有关。

六、其他若干问题

除了上面讨论的几个问题之外, 在熵研究中还存在着其他多种问题。从下面的介绍中可以发现, 其中有的问题目前尚难给出科学的解释, 而有的问题则是不是问题的问题, 来自对熵概念与熵原理的错误理解和错误使用。无论如何, 熵足以使我们进行“脑力体操”。

1. 熵概念的泛化

有的人认为物理熵(热学熵、统计力学熵)概念是合理的, 科学的; 信息熵、广义熵等概念中的熵已不是原来意义上的熵; 各种喻义熵, 如社会熵、经济熵等概念是不可取的。

另一种意见认为,熵概念从物理学领域向其他领域的扩展,即热学熵→统计力学熵→信息熵→测度熵→拓扑熵→广义熵的扩展表现了熵概念的强大生命力。问题不在于这种扩展,而在于在使用不同熵概念时没有明确地指出所使用的是什熵。这些不同熵概念之间虽有区别,但同时又存在着某种内在联系。

2. 物理熵概念的适用范围问题

有的人认为物理熵不能描述非热力起主要作用的系统,也就是说,物理熵概念不能用来描述非热力起主要作用的物理系统和生物、社会等复杂系统。

不同的意见认为:在复杂系统中,高级运动形式起着主要作用,但是高级运动都是建立在低级运动基础上的。生物、社会、经济等复杂系统终究可以看成是特殊类型的物质系统,其中存在着热运动,因此物理熵概念是可以用于研究这些热运动的。这种研究有助于揭示生物、社会、经济系统赖以存在和运行的物理基础和物理机制。当然,用熵概念所作的研究不能代替其他的研究,但是如果没有用熵理论所作的研究,那么对生物、社会、经济系统的研究不可能是充分的。不管什么系统,只要其中存在热运动,就可以和应该用熵理论加以研究。

3. 绝对熵问题

有人认为,按照热力学第三定律,绝对零度不可能达到,系统的熵不可能取零值,因此绝对熵没有意义。既然绝对熵没有意义,就不能说某一物的熵比另一物多或少。

不同的意见认为,经过长期的精细试验和量子统计力学的研究,热力学第三定律的正确性已得到证实。把绝对零度当作一个极限来考虑是可行的,从而可使用绝对熵概念,确定物质的绝对熵值。

4. 物理场熵

有人引入物理场熵(指温度、体积、浓度场熵等)概念,认为在孤立系统中一切热力学过程从非平衡态向平衡态的过渡都伴有某种物

理场熵的自发减小,它与热力学熵的增加同时发生,两者存在着一增一减的相互转化关系^①。

不同的观点认为:所谓物理场熵实际上就是信息熵,而信息熵和物理熵之间存在着正相关关系,见式(6.36)。因此,在孤立系统一切热力学过程从非平衡态到平衡态的过渡中,信息熵(包括物理场熵)与物理熵都是有增无减,并不存在一增一减的关系。

5. 热寂论

自从克劳修斯宣布“宇宙的熵趋于一个极大值”以来,热寂论一直是物理学家以及哲学家激烈争论的问题之一。这方面的争论仍在继续。

起初,热寂论所受到的批判是:把一个从孤立系得到的结论推广到整个宇宙是错误的,因为宇宙是一个开放系。对这种批判提出反批判并不难:首先,能量守恒定律和质量守恒定律都是从一个孤立系推广到整个宇宙的,因此没有理由认为热力学第二定律不能推广到整个宇宙。第二,如果整个宇宙的能量和质量都守恒,那么整个宇宙就可以看作是一个孤立系,从而可用热力学第二定律来解释整个宇宙的变化趋势。

这样,人们开始寻找反对热寂论的新根据。其中,下列两点受到重视。其一,是宇宙演化的实际情况。人们所看到的现实的宇宙并不像热寂论所主张的那样从有序到无序,从非平衡到平衡,而是从简单到复杂,从无序到有序,从单层结构到多层结构。其二,宇宙的膨胀和引力在宇宙演化中的作用受到重视。由于膨胀的不均匀,物态从热平衡到非热平衡的转变是可能的,而由于引力的作用,被耗散能量的重新聚集也是可能的。当然,所有这些议论也许都是针对有限宇宙的议论。

^① 张学文. 物理场的熵及其自发减小现象. 自然杂志, 1986. (11)

6. 喻义熵问题

熵概念在某些领域(首先是热力学领域)所取得的成功使得这些领域的某些学者将熵概念从这些领域推广到其他领域,同时还引诱其他领域的一些学者简单地借用熵概念(例如根据“熵即无序,无序即熵”的理解)来研究他们的领域。这样,我们到处都可以看到人们经常在比喻的意义上使用熵概念。例如,社会熵、经济熵、精神熵等概念就其目前所流行的意义而言大多属于这种喻义熵。

假如没有词义上的歧义性,在比喻的意义上使用熵概念也未尝不可。问题在于喻义熵的歧义性。当人们大谈社会熵、经济熵、精神熵等时,他们并没有认真考虑所说的熵究竟是指的什么,是 S_C 、 S_B 还是 H , 或者别的什么。似乎一切坏的东西都被说成是熵,一切坏现象的原因都被归结于熵的增加。因此,大量使用未加严格定义的喻义熵,不仅不能推进具体科学的发展,反而会造成更大的混乱。按照流行的说法,这也是熵的增加。

例如,有人在谈论“高熵社会”和“低熵社会”。但是我们无法知道是“高熵社会”好还是“低熵社会”好,我们应该追求哪一种社会。如果把“高熵社会”理解为是多样化的社会,把“低熵社会”理解为是单一化的社会,那么人们大概会喜欢多样化的社会,即“高熵社会”。但是,如果把“高熵社会”理解为是秩序混乱的社会,把“低熵社会”理解为是秩序井然的社会,那么人们所喜欢的大概是“低熵社会”。可是,一旦想到希特勒(Adolf Hitler, 1889—1945)、墨索里尼的法西斯主义制度也是属于一种“秩序井然”的“低熵社会”,那么就会因“低熵社会”而感到毛骨悚然。按照马克思和恩格斯的看法,共产主义社会既是一个广大社会成员都充分享受自由的社会,又是一个使广大社会成员置于严格管理之下的社会,那么我们应该说它是一种“高熵社会”还是一个“低熵社会”? 我们根本无法给出答案。因此,不难看出,所谓“高熵社会”、“低熵社会”、“社会熵”这些用语既不能正确地

解释某一社会制度的合理性,也不能揭示社会发展的历史趋势,反而造成极大的混乱。

对于经济熵以及其他的喻义熵也能进行与之类似的分析。实际上,大谈这些喻义熵只不过是时髦的熵概念来自欺欺人而已。或许,这只不过是思维惰性的迂回表现。但是,这并不是说我们在研究社会经济系统时不能使用科学的熵概念。

6.3 熵与生命·社会·经济系统

我们在前两节讨论了信息与熵概念以及一些基本理论问题。在本节,我们将用熵概念与熵原理论生命·社会·经济系统。虽然“社会熵”、“经济熵”等喻义熵概念在社会经济系统研究中造成了各种混乱,但是科学的熵概念在生命·社会·经济系统研究中却有着十分重要的意义。这里,我们先要指出,本节所用的“熵”是指物理熵,本节的讨论重点是经济系统。

6.3.1 物质系统的套箱结构

根据系统分类的一般原则和系统等级性的一般原理,我们可以

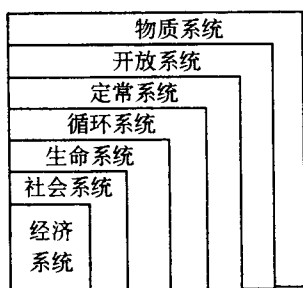


图 6—1 物质系统的
套箱结构

确定生命·社会·经济系统在物质系统中的地位。图 6—1 所示的是其中的一个可能模型。

具体系统,根据其要素是物质还是概念,可分为物质系统(如原子、分子、生物体、地球等)和概念系统(如科学体系、法律体系、宗教体系、哲学体系等)。

物质系统,根据它是否与外界进行物质/能量/信息/熵的交换,可分为开放

系和封闭系。现实中的每一物质系统实则都是开放系,封闭系只是对开放系进行近似处理的结果,即忽略与外界的相互作用而得到的模型。

开放系统,根据它能否在一定时间范围内保持其稳态结构,可分为定常系和非定常系。从无限长的时间流上看,任何现实系统都是非定常系,但是在某一足够长的时间范围内,确实有大量开放系可以看作是定常系或准定常系。

定常系统,根据其定常结构是否在循环中维持,可分为循环系(如对流、热机、生命系等)和单纯扩散系(如热传导、电传导等)。从无限长的时间流上看,任何定常系都是单纯扩散系,但是在一定时间范围内可以把一些定常系看作是循环系。

循环系统,根据它是否具有主体性,可分为生命系(如生物、社会、经济等)和无生命循环系(如对流、热机等)。

生命系统可分为生物系统和社会系统。生物系统可分为三个子系统,即动物、植物和微生物;社会系统可分为三个分系统即政治系统、经济系统和文化系统,而经济系统又可分为三个分系统即生产领域、流通领域和消费领域。

这样,物质系统的等级序列可表示为:

物质系 $\supset$ 开放系 $\supset$ 定常系 $\supset$ 循环系 $\supset$ 生命系 $\supset$ 社会系统 $\supset$ 经济系统 $\supset$ 生产/流通/消费。

这就是物质系统等级结构的一个套箱结构模型。在这一套箱结构中,内层系统和外层系统的关系可简述如下:

(1) 内层系统是在外层系统基础上产生的,但具有外层系统所没有的一些特性;外层系统的规律适用于内层系统,但内层系统有其特殊规律。

(2) 内层系统和外层系统的某些性质是相同的,即是说内外层系统在某些方面具有同一性;除了(1)中所说的由于包容关系而能适

用于内层系统的外层系统规律之外,还有一些系统规律基于内外层系统的这种同一性而既适用于外层系统,也适用于内层系统。

(3) 外层系统的某些性质具有加和性,就这种性质而言,外层系统等于其全部内层系统之和;研究这种性质时,可将内层系统的指标相加而得到外层系统的指标。

(4) 在一层次系统中可生长出其内层系统,或者一层次系统可溃散到其外层系统中去。在前一种情况下,套箱结构的层次数将增多;在后一种情况下,套箱结构的层次数将减少。物质系统的套箱结构能否维持,取决于各内外层系统之间的物质流、能量流、信息流和熵流的情况,取决于各层次系统的组元和结构。

6.3.2 熵与生命系统

生命系统是一种物质系统。因此,熵原理制约着生命过程,而生命系统不能摆脱熵原理的支配。为了弄清熵在生命系统中的作用,人们已进行了 100 多年的探索,出现了四种重要观点。

一、波尔茨曼的“涨落说”(1897 年)

早在 1868 年波尔茨曼认为:生物体为生存而进行的斗争,既不是为了基础物质,也不是为了能量,而是为了熵而进行的。他在科学史上第一次重视了熵在生命系统中的重要性。但是他无法解释生命究竟怎样为熵而斗争,最后(1897 年)只能以生命的“涨落说”敷衍了事。他指出:整个世界已经历了漫长的岁月,因此它应早已达到平衡。但是生命仍然存在,其原因在于生命是平衡中的局部涨落。

过了半个世纪以后,维纳又恢复波尔茨曼的“涨落说”。他指出:“当整个宇宙(如果真的有整个宇宙的话)趋于衰退时,其中就有一些局部区域,其发展方向看来是和整个宇宙的发展方向相反,同时它们内部的组织程度有着暂时的和有限的增加趋势。生命就在这些局部

区域的几个地方找到了它的寄居地。控制论这门新兴科学就是以这个观点为核心而开始其发展的。”^①

生命的涨落说在生物物理研究者中至今根深蒂固。可是如果认为生命是平衡中的局部涨落,就无法解释这一涨落的延续时间与宇宙演化时间相比并不短多少的原因;支持这一涨落的宇宙要比实际的宇宙大得多。

二、薛定谔的“负熵说”(1944年)

薛定谔在《生命是什么》一书中认为新陈代谢中“物质的交换应该是本质的东西的说法是荒谬的”,并认为生物体“以能量为生”的观点是“很荒唐”的,“因为一个成年有机体所含的能量跟所含的物质一样,都是固定不变的”。这就是说,他认为,生物体同环境进行的等量物质的交换和等量能量的交换对于生物体的生存来说并不是本质的东西。这样,他就提出了生命的负熵说。他写道:

“在我们的食物里,究竟含有什么样的宝贵东西能够使我们免于死亡呢?那是很容易回答的。每一个过程、事件、事变——你叫它什么都可以,一句话,自然界中正在进行着的每一件事,都是意味着它在其中进行的那部分世界的熵的增加。因此,一个生命有机体在不断地增加它的熵——你或者可以说是在增加正熵——并趋于接近最大值的熵的危险状态,那就是死亡。要摆脱死亡,就是说活着,唯一的办法就是从环境里不断地汲取负熵,我们马上就会明白负熵是十分积极的东西。有机体就是赖负熵为生的。或者,更确切地说,新陈代谢中的本质的东西,乃是使有机体成功地消除了当它自身活着的时候不得不产生的全部的熵。”^②

薛定谔的负熵说遭到了物理学家们的批判。他在1945年的修

① 维纳 N. 人有人的用处. 北京:商务印书馆,1978. 6

② 薛定谔. 生命是什么. 上海:上海人民出版社,1973. 78

订版中指出,生物体通过“散发热”,“处理掉”在“物质生活过程中不断产生的剩余的熵”。即是说,生物体通过向外界排除熵来维持与以前大致相同的熵的状态。但是他的这一新观点未能引起人们重视,而生物体“赖负熵为生”的观点却泛滥开来。值得一提的是杉田元宜于1952年指出,按照薛定谔的观点,通过放热排除熵也就可以看作是摄取负熵,同时他挖苦道:极而言之,摄取负熵的地方便是厕所。他认为应当重视的是作为熵代谢的、生命的再生产过程。

三、生命的“最小熵产生说”(1945年之后)

哲学家柏格森曾于1907年指出,解释生命并不需要有别于物理定律的所谓生命定律。但他认为,生命不能终止物质变化的步伐,却能使之变化缓慢。普里戈金于1945年发现在生命以外的世界中也有这种使物质变化缓慢的现象;在线性非平衡区,定态的熵产生取最小值。

许多生物学家认为最小熵产生原理支持柏格森的观点,认为生命系统虽然不能阻止熵的增加,但是能使之变化缓慢。但是,经济学家乔治斯库-罗根(Nicholas Georgescu-Roegen, 1906—1994)于1971年针锋相对地指出:生命系统的熵产生比起无生命系统更加激烈。

四、槌田敦的“循环说”(1978年)

槌田敦比较宇宙的历史和生命的历史,从中否定“涨落说”;他批判负熵概念的不合理性并强调排熵机制的重要性,从中否定“负熵说”;他肯定生命系统的熵产生要比许多非生命系统更为激烈的观点,从中否定生命的“最小熵产生说”。在这基础上,他把定常开放系理论引入到生命系统,分析生命系统的特性,建立了生命的“循环说”。

在槌田敦看来,任何流动都有初态、中间过程和终态。当人们着眼于中间过程时,定常开放系可分为三种:

其一,是单纯扩散系,如热传导、电传导、不具旋涡的河流等。

其二,是循环系,如流体的对流、热机等。在地表上存在着各种循环。例如,在大气层中有水循环和大气循环;在海洋中有海水的循环;在生态系统中有生物循环;在人类社会中有各种物质循环;在生物个体内部有各种物理循环和化学循环。在所有这些循环中,多余熵不断由热流和物流排放到环境中去。但是热流不可能是循环流,因为热传递是不可逆的。因此,循环的承担者是物质;循环系的维持靠的是物质循环,而物质循环的形成和维持靠的是物质分布在空间、时间或时空上的不对称。

其三,是生命系。所谓生命系,是一种特殊的循环系,是能够积极而自主地维持循环的循环系,是具有主体性的循环系。生命系的特征在于:首先,生命系含有许多元循环,而构成元循环的所有元过程都是不可逆的。当完成一个元循环时,就产生多余熵。每个元循环逐次把这些多余熵排

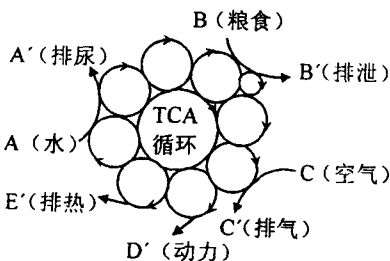


图 6—2 生命系的循环结构(动物)

槌田敦, 熟学外论, 东京: 朝仓书店, 1992. 116

放到其他元循环,最后把整个系统的多余熵排放到环境中去,如图 6—2 所示。其次,生命系的本质特征在于它的主体性。生命系必须由大量元循环组成,但是由大量元循环组成的循环系未必是生命系,如对流不稳定性中所出现的花纹、贝洛索夫(Boris Pavlovich Belousov, 1893—1970) - 扎鲍廷斯基(Anatol M. Zhabotinsky, 1938—)反应中出现的花纹等并不是生命系。主体性才是生命系的本质特征。即就是说,生命系具有自主的、自立的、自卫的循环功能,靠自己的能力维持和补充循环物质,靠自己的努力维持和修复循环结构。

总之,在槌田敦看来,生命系是诸元循环相互和谐的具有主体性

的循环系,这些循环的维持,即熵的有效排出意味着生存,循环的迟滞,即排熵机制的钝化意味着疾病,循环的停止,即熵的过多积累意味着死亡。

6.3.3 熵与经济系统

社会经济系统是一种特殊的生命系统,社会经济系统中的物质过程和能量过程都伴随着熵过程。因此,研究社会经济系统就必须研究物流、能流和熵流。

但是,20 世纪之前的西方经济学把经济系统当作封闭、平衡、线性系统,把自己的眼界局限于狭义的经济过程(生产、流通、分配、消费),当研究这些经济过程时又把自己的眼界局限于物流和能流。在运用自然科学成就时,主要考虑的是牛顿力学、化学和热力学第一定律。进入 20 世纪后,随着工业的发展、人口的增长和交通的发展,人类在全球范围内面临严重的环境污染问题、资源问题和生存空间问题。应运而生的是积极引入熵概念和熵原理来补充和改造传统经济学的新思潮。

早在 20 世纪 20 年代,索迪(Frederick Soddy,1877—1956)就指出:热力学定律“最终控制着政治制度的兴盛与衰亡,国家的自由与奴役,商务与实业的命脉,贫困与富裕的起源,以及人类总的物质福利”^①。但是他的这一观点当时并没有引起人们的重视。

到了 60 年代初,保尔丁用熵原理研究经济过程,明确地指出:消费是一种熵增加过程。我们吃进的物质比我们所排泄的物质有序度高,汽车比废铁有序度高,衣服比破布有序度高,等等。因此消费意味着使有序退化为无序,这是一种典型的熵过程。相反,生产是一种反熵过程。生产把土壤、空气和水变成小麦和面包,把矿物和岩石变

① 杰·里夫金、特·霍华德. 熵:一种新的世界观. 上海:上海译文出版社,1987. 5

成钢和机器,把纤维变成布,把布变成衣服。在所有这些场合中生产都是使一处具有较高级别的有序,而作为其代价,在另一些地方产生更高级别的无序(矿渣、废料等)。因此,生产是典型的进化过程,它分凝熵,并造出高度有序的低熵产品,当然这无疑是以在别处产生高熵废物为代价的。

接着,在 70 年代初,乔治斯库-罗根指出:从物理学的角度上看,经济过程是熵过程;力学现象是可逆的,而熵现象是不可逆的,这是古典经济学和机械论的认识论所没有注意到的问题;财富是一种开放系统,它是在以低熵物能的消费为开端并以向环境排出等量的高熵物能为终点的流通过程中生产出来的;两大低熵源(太阳能与凝聚在地壳中的低熵物质)之间存在着反对称。

在前人这些研究的基础上,槌田敦及其合作者从 70 年代起用熵概念和熵原理研究经济系统,取得了许多引人注目的成果。现以槌田敦等的研究结果为基础,将我自己对经济系统的观点整理如下^①。

一、绝对静止参照系与“自然无限论”

从某种意义上说,劳动价值论在当前的遭遇十分类似于经典力学在 19 世纪末、20 世纪初的遭遇。

我们知道,牛顿力学和劳动价值论都是 17 世纪的产物。一个重要的区别是,当时牛顿力学已经建成了较完善的体系,而劳动价值论只有很不完善的雏形。这一时间差异几乎原封不动地复现在现代人面前。在 19 世纪末、20 世纪初的物理学危机和革命中,由于绝对运动的不可观测性已被确认,牛顿力学赖以建立的绝对静止参照系被摧毁了,而绝对空间和绝对时间也就成为科学史上的陈迹;相对论和

^① 朴昌根. 熵与经济过程中的若干问题. 见:车宏安等(编). 熵:理论与应用. 北京:中国科学技术出版社,1991. 163—177

量子力学应运而生。

如果说绝对静止参照系是牛顿力学体系的支柱,那么“无限的自然”^①乃是劳动价值论的支柱。就是说,认为经济活动赖以进行的自然是无限的假说相当于牛顿力学关于绝对静止参照系的假说。无限的自然才能为使用价值的无限增长提供物质基础,从而为价值的无限增长提供现实基础。如果自然被确认为有限的,那么使用价值的无限增长就失去物质基础,从而使价值的无限增长成为一种神话。

例如,资本循环的全过程被表示为:

$$G - W \begin{matrix} \swarrow A \\ \searrow P_m \end{matrix} \dots P \dots W' - G'$$

其中, G 表示货币, W 表示商品, A 表示劳动力, P_m 表示生产资料, P 表示生产, P 前后的虚线表示流通过程的中断和生产过程的进行, W' 表示包含着剩余价值的商品, G' 表示价值增大了的货币量。在每个具体情况下, G 和 G' 都是有限的,但是这一模型包含着资本无限增值的可能性,而这一无限性以 W 和 W' 的无限性作为中介得到实现。另一方面,如果只考虑循环

$$W \dots P \dots W'$$

就不难看出这个循环不仅在其现实性上而且在其潜在性上都不可能是一个无限过程,从而使 $G - G'$ 不能成为一个无限过程。

W, W' 与 $W - W'$ 的有限性显然是自然有限性的一种结果。现在,资源的断缺,人口的膨胀,环境的恶化,已经使人们认识到人类赖以生存的自然并不是无限的。

首先,自然界所能为人类提供的资源总量是有限的。即使在假

① 这里,“自然”、“自然界”限指能为人类的经济活动提供资源,容纳其产品和废弃物的那部分物理空间,并非指整个宇宙。

定太阳能是无限大的情况下,其中人类所能利用的部分是有限的。非再生资源的总量和再生资源的总量都是有限的。换言之,人类的经济活动赖以进行的自然物和自然力的扩散能力(热学使用价值)是有限的。

其次,自然界不能为人类提供无限大的垃圾场或废弃物堆放场地。有的人认为现代科学技术完全有能力对付人类面临的一切污染问题,有的问题即使现在暂时无法解决,以后总会得到解决。但是,问题不在于人类有没有这种潜在能力,而在于有没有这种实际条件。对于有幸生存在地球上的人类来说,既不能在把整个地球变成垃圾场的情况下继续生存,也不能以把地球上的垃圾排放到太空中去的方式持续生存。

其三,自然界不能为科学技术的应用提供无限大的现实条件。毫无疑问,这二三百年来,经济增长最重要的推动力是科学技术。但是,科学技术本身并不是现实的生产力,科学技术只有在各种自然条件(包括各种自然物和自然力)所允许的范围内才能转化为现实的生产力。根据杠杆原理,一个人完全可以在观念上设计出一条杠杆和一个支点,把地球抬起来。但是,在现实中这是永远办不到的。科学技术之推动经济增长,有其自然限界。

最后,自然界不能为人口的无限增长提供无限大的生存空间。人类的基本生存空间只能是地球,我们有必要像揭穿“皇帝的新装”之谜的孩子那样直截了当地指出这一点。人口向其他星球的迁移或向太空站的扩散之类的设想,只不过是一种美好幻想。

从上可知,几百年来的信条即认为“无限增长的需要可以用经济的无限增长来满足”的信条应当抛弃。经济的增长、使用价值的增长、价值的增值有其不可逾越的自然限界。为科学地解释这一自然限界奠定理论基础的是熵概念和熵原理。如同相对论通过抛弃绝对静止参照系使物理学获得新生一样,熵理论将帮助经济学抛弃自然

无限论,迎来经济学的变革。

二、经济系统的若干特征

从上述的物质系统套箱结构,如图 6—1 可知,应该从不同层次上研究经济系统的性质。

当把经济系统当作社会系统的一个分系统的时候,阐明经济系统、政治系统和文化系统之间的相互关系是一个基本的研究课题。当把经济系统当作经济系统来研究的时候,研究经济系统中的价值流显然是经济学的基本任务。劳动价值论在它已完善的形式上对经济系统中的价值流作了极其深刻的分析,从中揭示了资本主义社会的经济运动规律。但是,当无情的现实迫使人们抛弃自然无限论,接受自然有限论,并且,相对独立的各国民族经济结合成统一的全球经济系统,从而使整个人类与整个自然界相对立的时候,对经济系统内部物质过程的研究开始受到人们的重视,因为作为经济系统赖以存在的首要因素的“劳动首先是人和自然之间的过程,是人以自身的活动来引起、调整和控制人和自然之间的物质变换的过程。人自身作为一种自然力与自然物质相对立”。^①

下面我们将经济系统当作一种物理系统,来考察它的若干基本性质。

1. 经济系统的物理基础

经济系统是一种物质系统,经济过程是一种物理过程。在经济系统内部,不仅存在着价值流,而且存在着物流、能流、熵流和信息流。正如商品的使用价值是交换价值的承担者,因而是价值的物质承担者一样,经济系统中的物流、能流、熵流和信息流是价值流的物质承担者。在一个基本的经济过程中,这四种流如图 6—3 所示。

^① 马克思. 资本论(第 1 卷). 北京:人民出版社,1975. 201—202

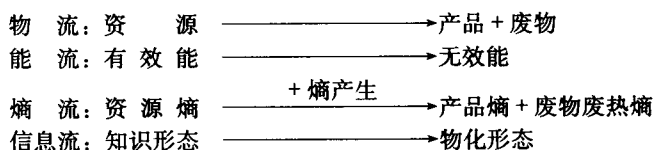


图 6—3 经济系统内部的流

在物流中,质量守恒,但物的品位下降;在能流中,能量守恒,但能的品位下降;在熵流中,熵增大,而且熵流的方向与物流和能流的方向相一致;在信息流中,信息从知识形态转化为物化形态,但是知识形态的信息又继续保存下来。在下面的讨论中,本文将只讨论物流、能流和熵流。

2. 经济系统的开放性

经济系统是一种开放系统。一个经济系统,在与其他经济系统的关系上,可能是封闭的(如自然经济),亦可能是开放的(如当今世界的各国经济)。但是在与自然界的关系中,任何经济系统都是开放系统,与自然界进行物交换、能交换和熵交换。

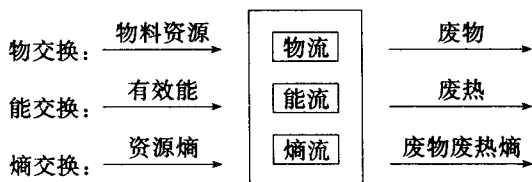


图 6—4 经济系统与自然界的交换

图 6—4 中可知,经济系统在与自然界的物交换中,输入的是物料资源,排出的是废物;在能交换中,输入的是有效能,排出的是废热;在熵交换中,资源熵进入系统,系统内部的物质变换过程中出现熵的增加,其中的一部分残留在产品之中,而其中的大部分以废物废热的形式排放到环境中去。如无与环境的这些交换,经济系统就不可能运行;而物交换与能交换之所以能实现,是因为这两种交换都是

熵增加的过程。

3. 经济系统的定常性

经济系统是一种定常系统。定常系统的一般原理适用于经济系统。从物质、能量、熵的输入—输出关系出发,可将经济系统表示为图 6—5。

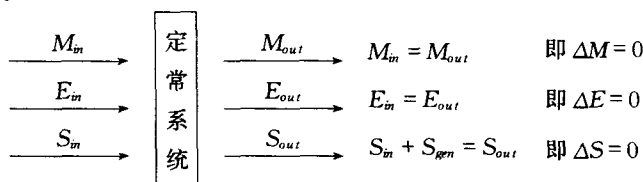


图 6—5 定常系统

图中, M, E, S 分别表示物质,能量,熵。在经济系统研究中, M_{in} 表示资源物质的总量, M_{out} 表示产品和废物的总量; E_{in} 表示能量输入的总量, E_{out} 表示能量输出的总量; S_{in} 表示资源的熵, S_{out} 表示产品和废弃物的熵, S_{gen} 表示经济过程中的熵产生。

简单再生产满足上述的三个条件,是不难理解的。在扩大再生产中,从价值流的角度上看,由于一部分剩余价值转化为新的资本,生产规模有所扩大。但是,从物理学的角度上看,系统的定常性在生产规模扩大了的情况下仍然能维持。经济系统规模的扩大过程并不破坏经济系统的定常性。

在讨论系统(包括经济系统)的定常性时,必须考虑系统为维持其定常性所必需的环境条件。设系统 A 是一个定常开放系,它的内部结构适于它持续维持定常性;设 B 是系统 A 的外界环境。那么,

(1) 如果 B 是定常开放系,而且 B 的熵密度小于 A 的熵密度,则 A 就能维持定常性。

(2) 如果 B 不是定常开放系,而且 B 的规模无穷大,同时它的熵密度又远小于 A 的熵密度,则 A 也能维持定常性。

就现实的经济系统而言,由于其外界自然环境是有限的,经济系

废热被排放到外界环境,而所生产出的产品通过流通过程 I 进入消费过程。在消费过程中,生活资料一经消费,就产生劳动力,同时将这个过程中产生的废物废热排放到环境中去。生产资料则与再生的劳动力一起通过流通过程 II 返回到生产过程,由此完成一个循环。

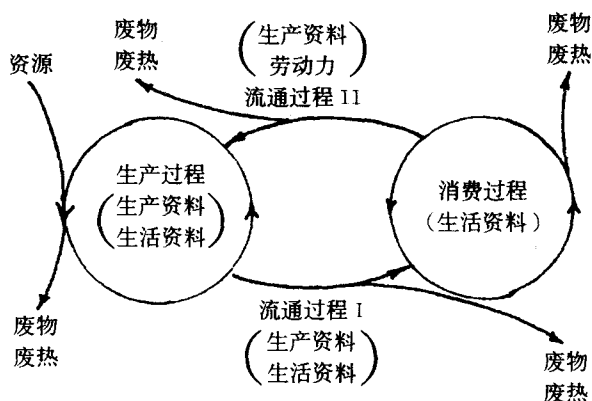


图 6—7 经济循环

朴昌根. 熵与经济过程中的若干问题. 见: 车宏安等(编).

熵: 理论与应用. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 163

同其他循环一样,经济循环也是由工作物质和工作机构构成的。在生产过程中,工作物质包括原料、燃料、水等,工作机构包括厂房、机器、工具、容器等。在生活资料的消费过程中,工作物质为生活资料,工作机构为人体结构。在流通过程中,工作物质为生产资料、生活资料、劳动力等,工作机构为汽车、火车、轮船、飞机等各种运输器械。当经济系统完成一个循环的时候,工作物质或者改变原来的形态(如原料加工成成品),或者改变原来的位置(如机器零件被组合成一台机器,生产资料从一处被搬运到另一处);但是,工作机构保持原来的形态,并且明天以同昨天一样的形式进入经济过程。

5. 经济系统的主体性

经济系统是一种生命系统。与无机循环系不同,生命系是一种能够积极而主动地维持循环的循环系。生命系的特征可以从两个方面考察。

其一,生命系的循环结构是一种套箱结构,如图 6—8。生命系含有许多子循环,这些子循环又由下一层次的子循环构成,最下面的子循环可称为元循环。

在经济系统中,套箱式循环结构是显而易见的。首先,可以看到生产循环、流通循环和消费循环,如图 6—7 所示。其次,可以看到生产循环、流通循环、消费循环各部门中的循环。如此分析,最终可以看到最基本的生产单位(如一家工厂或其车间)、流通单位(如一家商店)和消费单位(如一个家庭或个人)中的元循环。因此,整个经济系统构成一个由大量元循环构成的具有层次性的循环网络。

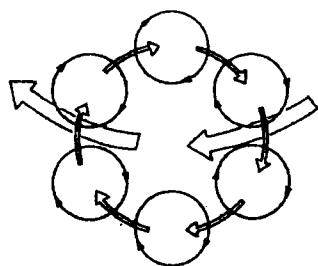


图 6—8 循环的套箱结构

槌田敦, 热学外论, 117

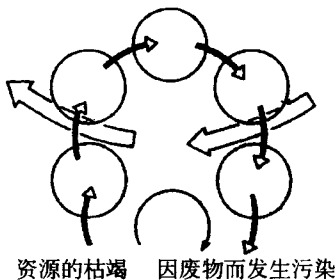


图 6—9 循环的破坏

槌田敦, 热学外论, 117

其二,生命系的本质特征在于它的主体性。生命系都是由大量元循环组成的,但是由大量元循环组成的循环系未必是生命系。主体性才是生命系的本质特征。即是说,生命系具有自主的、自立的、自卫的循环功能,能靠自己积极而主动的努力维持和修复循环结构。如图 6—8 所示的循环结构的一个元循环被破坏,那么与其相连的一

个元循环就得不到资源,另一个则会受到污染的威胁,如图 6—9 所示。如果不及时修复被破坏的元循环,或者不及时连接被断开的上一层次循环链,整个系统的循环就会被破坏。在这种情况下,生命系就能主动地做出某种努力,或者补充工作物质,或者修复工作机构,使系统内部的循环得到恢复。

在经济系统中这种努力尤为明显,例如一家工厂,如果产品销路不畅,就采用多做广告,委派推销员前往各地推销,或者提高产品质量,降低产品价格等手段扩大销路,甚至采用转变产品项目的方法力求恢复循环。如果原料不足,则采用委派采购员前往各地采购,或者使用替代原料等手段力求恢复循环。

6. 经济系统的社会性

经济系统是一种社会系统。作为社会系统的一个分系统,经济系统制约着社会系统另外两个分系统即政治系统和文化系统,同时又受着这两个分系统的制约。

考虑到经济学的历史和现状中所存在的一些偏向,这里有必要指出:对经济系统的社会属性的研究必须以对经济系统的物理属性的研究为基础。如果不弄清经济系统的一般性质,即人类社会的一切社会形式中所共有的性质,也就不可能完全弄清特定社会形式中的经济系统。在实际的研究中,这两方面的研究是相辅相成的。

7. 经济系统的熵原理

在经济系统中,如同在其他自然过程中一样,物流和能流总是伴随着熵流;物流和能流总是朝着熵增加的方向进行。人们在经济过程中得到的低熵产品和低熵动力总是以产生废物废热为代价。如无从资源到废物废热的熵流,就不可能发生物流和能流。

经济过程不仅作为一个整体,而且它的三个分过程即生产过程、流通过程、消费过程都是熵增加的过程。

在生活资料的消费过程中,食物变成粪便,燃气变成废气废热,

电能变成废热,等等。这些都是典型的增熵过程。

流通过程,不生产产品,只是把生产过程的产品(各种生产资料和生活资料)和消费过程的产品(劳动力)从一处运到另一处。这也是一个增熵过程:运输器械耗费大量燃料;运输器械和道路、铁路、海水、空气等的摩擦产生大量废热;从发电厂到用户的输电线上一部分电能变成废热;等等。

生产过程容易被看成是减熵过程,因为产品的熵小于原料的熵,动力的熵小于燃料的熵。但是,生产过程也是一种增熵过程。生产过程的一般模型如图 6—10 所示。

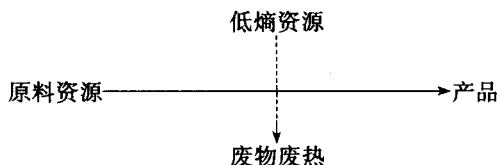


图 6—10 生产过程

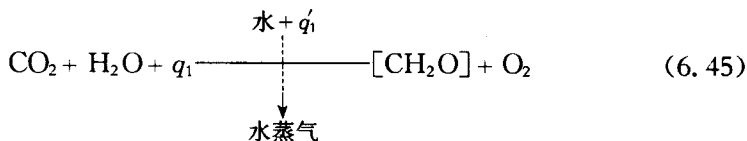
生产过程的熵关系式可以写成

$$S_{\text{原料资源}} + S_{\text{低熵资源}} < S_{\text{产品}} + S_{\text{废物废热}} \quad (6.43)$$

或者,可写成

$$S_{\text{原料资源}} + S_{\text{低熵资源}} + S_{\text{熵产生}} = S_{\text{产品}} + S_{\text{废物废热}} \quad (6.44)$$

甚至,农业生产也是一个增熵过程。在农业中,人作为流通手段起作用,人的劳动过程并不增加使用价值,使用价值的增值是光合作用的结果。所以,在农业生产中熵能否减少,主要取决于光合作用是不是一个减熵过程。与人们通常所想象的不同,光合作用是一个增熵过程。在光合作用方程式



中,设光合作用发生时大气压强为 1 个大气压,温度为 25°C ,蒸发热为 10.5kcal/mol ,则变成水蒸气的水为 22.9mol 。取熵的单位为 $\text{cal/deg} \cdot \text{mol}$,那么根据槌田敦的计算^①,光合作用前后的熵分别为

反应前	反应后
CO_2 67.2	$[\text{CH}_2\text{O}]$ 8.5
$(22.9 + 1)\text{H}_2\text{O}(l)$ 399.1	O_2 49.0
	$22.9\text{H}_2\text{O}(g)$ 1032.8
466.3	1090.3

可见,在光合作用中熵不是减少,而是增加。这是因为光合作用的实现不能仅靠式(6.45)中的横向过程,必须同时发生此式中的竖向过程。

与其他生命系统一样,经济系统不是处于平衡态,也不是处于线性非平衡态,而是处于非线性非平衡态。所以,经济系统的熵产生速率不是取零,也不是取最小值,而是相当大。随着工业的发展和科学技术的导入,经济系统的熵产生速率越来越大。一部人类社会发展史,可以说是一个加速熵产生速率的历史过程。

此外,经济系统是在循环中维持其定常性的。如图 6—8 所示,一切生命系(包括经济系统)都含有大量元循环,而构成元循环的所有元过程都是不可逆的。当完成一个元循环时,就产生多余熵。这些多余熵就按照系统内部的既定次序,依次被排放到下一个元循环、下一个循环层次,最后整个系统的多余熵被排放到外界环境。经济系统只有当它通过内部循环有效地排出这些多余熵时,才能正常运行;如果熵排放机制变得迟钝,或者外界环境无法接收这些多余熵,经济系统就会出现混乱,甚至完全崩溃。

① 槌田敦,热学外论,97—99

三、问题与讨论

下面,我想简要地讨论当把熵概念和熵原理引入经济系统研究时经常出现的几个问题。

1. 在漫长的人类史中,经济系统能维持定常性的依据是什么?

首先,广义的生态系统在大气循环、水循环和生物循环中保持定常性。在大气循环和水循环中,地球上的热熵被排放到外层空间,在生物循环中物熵转变成热熵。

其次,在相当长的时期内,地球上的人口密度很小,即经济系统的规模很小,使得人类不用担心资源问题,也不用担心如何排放经济过程中产生的废物废热。

最后,在工业社会之前,人类所经营的是自给自足的自然经济,这种经济系统的资源来自地球生态系,而它的废物废热能顺利进入地球生态过程。

2. 解决资源问题的出路在哪里?

地球是有限的,地球上的非再生资源和可再生资源的总量是有限的。因此,人类必须合理控制非再生资源的消费。但是,从长远看,更重要的是合理使用可再生资源,来防止可再生资源转化为非再生资源,防止可再生资源总量的减少。

在资源问题上,人类所面临的最大威胁乃是非再生资源的胡乱开采和使用正在加速破坏可再生资源的再生机制。真正的资源危机将不是非再生资源的枯竭,而是可再生资源的枯竭,是生态循环遭受破坏。这又表明,资源问题和环境污染问题结合成一个问题即生态问题。

人口问题也与资源问题联系在一起。人口的过度膨胀必将破坏可再生资源的再生机制,因为可再生资源的总量是有限的。

3. 在开放系统中,熵的增加和系统有序性的增加能否并行发生? 如能,关于熵增加的忧虑是不是多余的?

有的人曾经把封闭系的熵原理简单地推广到开放系统,认为开放系统从无序状态过渡到有序状态时,它的熵一定减少。但是,经验上的和理论上的研究都表明,在开放系中,系统有序度的增加和熵的增加是可以并行进行的:高熵状态既可能是高度有序的状态,也可能是高度无序的状态。熵不可能是判断系统有序性的普适判据。

实际上,在生物进化中,生物从低级到高级的进化是生物体的熵不断增加的过程;在人类社会中,随着社会的进化,它的组织性、有序性和熵同时在增加。这种进化过程是靠有效能耗的增加来实现的。如果只考虑熵、有效能与序,在开放系统中熵的增加是并不可怕的。但是,我们务必记住:

首先,一个系统在提高有效能耗的情况下,能否保持定常性和有序性,是为其他一些因素所制约的,至少有热力学和物性论方面的限界。如超出这一限界,有效能耗的增加不仅不能维持系统的有序性,反而会成为破坏系统有序性的直接原因。

其次,地球上的资源是有限的,因此经济系统不可能取得无限多的有效能输入。

最后,地球生态系统的废热处理能力是有限的,因此如果经济系统排放过多的废热,就会破坏生态循环,进而破坏经济循环。

4. 在经济系统中,信息能否抵消熵?

自从薛定谔提出“负熵”概念和生物体“赖负熵为生”的观点、布里渊主张“信息即负熵”以来,认为信息能抵消熵的观点流行于世。这种观点被应用于研究经济系统,就出现了认为管理的本质是一个负熵过程、信息能抵消经济系统熵的观点。这种观点实际上是从错误的前提出发得到的错误的结论。

首先,负熵概念不能成立。

其次,信息与熵不是同一论域中的概念,因此信息与熵之间不存在直接的变换关系。这正如对一个饥寒交迫的人来说,既不能通过

阅读营养学书籍来充饥,也不能通过观看时装表演来御寒。他所需要的不是有关衣服和食物的信息,而是实实在在的衣服和食品。对于一个经济系统来说,信息的输入再多也无法用这些信息来直接减少其中的熵。不仅如此,信息输入过程作为一种物质过程也伴随着熵的增加。一个系统要减少熵,不能靠吸收信息,只能靠向外界排放熵。对于经济系统来说也是如此。

当然,我并不否认对一个经济系统来说,信息的输入或合理的管理可以减少系统内部的熵产生。或者说,通过输入信息,可以使经济系统内部的物质变换过程按照最科学的方式进行,尽可能减少因不合理的物质变换过程而出现的熵产生量,尽可能有效地把熵从经济系统排放到环境中去。信息的作用、科学技术的作用以及管理的作用就在于此。

因此,正确的思路不是想用信息输入来减少系统的熵,而是在于怎样有效地排出系统内部的多余熵,怎样有效地减少系统内部过程中可能出现的不合理的熵产生。

5. 唯熵论还是科学的变革?

在 19 世纪末,奥斯特瓦尔德(Wilhelm Ostwald, 1853—1932)曾提倡唯能论(又称能一元论),试图否定物质的存在,只能用概念解释一切自然现象、社会现象和生命现象。如今唯能论早已被彻底埋葬了。

有趣的是到了 20 世纪末,人们却掀起了用熵概念和熵原理研究物理系、生命系、生态系、社会经济系统和资源问题的热潮。这一热潮刚刚形成,但有人已提出要反对唯熵论(又称熵一元论)。

理所当然,只用熵概念和熵原理来解释一切自然现象和社会现象的所谓唯熵论是错误的。但是,世界上的一切现象都伴随有熵的变化,都受着熵原理的制约。而且,迄今为止,熵原理是惟一的与时间的方向性及不可逆过程有关的物理法则。如不考虑熵过程,我们

不仅不能透彻地揭示自然系统的存在与变化机制,也不能揭示社会经济系统的运行和发展机制。因此,对各种物质系统内部熵过程的研究决不是什么唯熵论,而是每一种物质系统的研究所不可缺少的最基本的内容之一。

用熵概念和熵原理研究各种物质系统之所以非常重要,又是因为在过去的科学研究中人们未能充分重视熵概念和熵原理。甚至可以说,在 20 世纪 70 年代之前,几乎没有人用熵概念和熵原理系统地研究过生命系、生态系、人类社会经济系统和资源问题。就是在物理学领域,对开放系统的熵过程的研究还是很不够。实际上,许多传统科学的不足之处或错误似乎都与对熵概念和熵原理的忽略或无知密切相关。可以相信,熵概念和熵原理将为生物学、生态学、经济学等学科带来具有划时代意义的变革。

当然,熵理论不能代替各门具体科学。对各种具体系统内部熵过程的解释不能代替对这些系统特殊性的研究,尤其在社会经济系统研究中是这样。

此外,有必要指出的是,在各种具体系统的非物理机制的研究中乱用物理熵概念或具有歧义性的喻义熵概念的做法是不可取的,因为这种做法不仅不能促进具体科学的发展,反而会造成混乱。

6. 人类在自然界中的地位应当如何?

人是为人而生存的,人类是为人类而生存的。但是人类只有在自然中才能生存。人类在认清与自然的关系上付出了巨大的代价。只是在用熵概念和熵原理研究物质系、生命系、社会经济系统、生态系和资源问题之后,人类才真正认清了与自然的关系。

我们知道,在那遥远的古代,人类曾经是自然的奴隶,自然力作为一种可怕的异己力量支配着人类;人类把自然看作是神。

随着煤炭文明的产生和发展,人类认识到了自己的潜力,靠了科学技术的力量,企图使自然向人类屈服;人类肆意践踏自然。当时,

人类的口号是“不做自然的奴隶，要做自然的主人”；人把自己看作是神。

但是，物极必反。石油文明所带来的福利和所造成的破坏终于使人类意识到自己的限界、科学技术的限界和自然的限界。宇宙间除了上帝就没有全知全能者。人类认识到自己归根到底是自然的一部分，人类的能力归根到底是自然力的一部分，人类的未来终究要取决于自然的未来。人类不能满足于做自然的奴隶，也不能成为自然的主人。人类只能作为自然界的朋友和伙伴，和自然一起生存，一起生活，一起生长。人类的未来、人类的理想、人类的幸福在于人的内在的和谐、人与人之间的和谐以及人与自然的和谐之中。

为了实现与自然的和谐，人类必须把这个“类”即全人类的整体利益放在首位，各种局部利益必须服从全人类的整体利益。还应当历史地考虑人类的利益。不应当为了某一“代”人的利益而牺牲人类的长远利益。如果有一种措施只有利于一部分人而有害于人类，或者有利于某一“代”人而有害于后代人，那么就应当坚决抛弃它。那么，污染问题、资源问题、人口问题、粮食问题以及发展问题都将得到合理的解决。

第七章 系统进化

存在与进化的对立与统一贯穿于几千年来的宗教、哲学、科学和整个人类社会。在每个历史时期,通常是其中的一方被看作是神圣的,另一方却被冷落。但是,现在我们已不能不承认,存在与进化的对立与统一不仅是整个世界的本质,而且是每一个系统的本质。当我们谈论一个系统的时候,我们说它是存在的,但是它不是不变的存在,而是变化中的存在;当我们谈论一种变化的时候,它总是指某个存在物的变化。现在甚至连物理科学也以过程或进化为物质存在的第一要素,系统进化的研究成为系统学研究的前沿是一个十分自然的事情。本章的主要目的是讨论系统进化的基本原理及其若干应用。

7.1 进化论的进化

按照《辞海》上的解释,“进化”即“演化”,又等于哲学上的“发展”。中文的“进化”一词来自英文的 evolve,而这个英文词的原意为“展开”。作为一种理论,“进化论”最早是由法国博物学家拉马克(Jean Baptiste Lamarck, 1744—1829)在生物学领域提出的。但是,“进化”一词已经渗透到宗教、哲学、科学和人类社会的几乎所有领域。在这个进程中,“进化”的含义也有了多种不同的解释。本书中,我们在最广泛的意义上使用“进化”一词。如托·赫胥黎(Thomas Henry Huxley, 1825—1895)所说:“现在一般应用于宇宙过程的‘进

化’一词,有它独特的历史,并被用来表示不同的意义。就其通俗的意义来说,它表示前进的发展,即从一种较单一的情况逐渐演化到一种比较复杂的情况;但其含义已被扩大到包括倒退蜕变的现象,即从一种复杂的情况进展到一种比较单一的情况的现象。”^①

7.1.1 进化论从猜想到科学的发展

在进化问题上,人们首先关心的不是现存事物将进化为什么的问题,而是现存事物是由什么进化而成的问题;不是现存事物如何进化的问题,而是现存事物是如何进化而成的问题。

古希腊罗马时代的许多哲学家(通常同时又是科学家)以探索世界本原的方式对于世界的进化问题发表过各种至今令人惊叹的见解。他们无疑是系统进化论的伟大先驱。

在经历了漫长的中世纪后,16—17 世纪的科学革命以血和生命为代价使科学摆脱了神学的枷锁。科学家们不再以对创世说的无聊注释来掩饰内心的不安。他们的目光朝向自然界,他们的兴趣转向实验,从此科学便大踏步地前进了。哥白尼的日心说、开普勒(Johannes Kepler, 1571—1630)的行星运动规律、牛顿的力学体系、林耐的分类学相继地建立起来了。可是,不幸又难免的是,每一条新发现的自然规律都被视为绝对真理,并与绝对不变的自然界相对应。于是,“自然界的任何变化,任何发展都被否定了。开始时那样革命的自然科学,突然站在一个彻头彻尾保守的自然界面前”^②。在这个自然界中,今天、过去和未来的一切都是绝对等同的。

但是,现实的自然界与其说是存在着,不如说是生成着和变化着。人不能两次踏进同一条河流。科学的任务与其说是发现自然界

① 赫胥黎. 进化论与伦理学. 北京:科学出版社,1971. 4

② 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 10

的不变的秩序,不如说是探索不断变化的秩序。人类已经以令人满意的形式解释了不变的自然秩序,那么永恒的求知欲必然将人类引向自然秩序的变化。不过,科学不能指望于上帝的手指,自然之谜必须以自然本身来解开。首先,康德以星云假说宣布了太阳系的生成,而以潮汐理论预言了太阳系的灭亡。其次,当原来深信摩西创世神话即“现有的物种都是全能的上帝原来所创造的物种”的林耐也不得不承认由杂交可能产生新物种的时候,拉马克从生物与环境的相互作用中说明了物种的多样性和生物从低级到高级的进化。还有,赖尔(Charles Lyell, 1797—1875)“第一次把理性带进地质学中”,“他以地球的缓慢的变化这样一种渐近作用,代替了由于造物主的一时兴发所引起的突然革命”^①。

进化论思想已经出现在宇宙学、地质学和生物学领域,永恒不变的自然界开始动摇了,而万古永世的自然秩序开始瓦解了。但是康德、拉马克和赖尔的进化论一方面由于当时还缺乏必要的材料而臆测胜过事实,另一方面由于当时人们还缺乏接受进化论的社会的和理论上的准备,未能被科学界广泛接受。康德的工作被埋没了整整 90 年,拉马克的进化论常被作为众人取笑的对象。尽管这样,进化论的种子已经播下去了,沉默和压抑只不过是等待新生命破土而出的前奏和阵痛。

进化论作为一种科学理论,是 19 世纪 50 年代的产儿。在那富于创造性的光荣年代里,在科学的三个领域几乎同时产生了科学的进化论。那就是克劳修斯等人的热力学第二定律、达尔文的物种进化论和马克思的唯物史观。

第一,克劳修斯于 1850 年指出:热不能自动从低温物体流向高温物体,即热传导是不可逆的。当然,与此同一的观点已由汤姆生于

① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 13

1848 年提出。克劳修斯的伟大功绩在于他引入了一个与系统的具体要素性质无关的物理学状态函数熵。热力学第二定律被表示为在孤立系统中

$$dS \geq 0 \quad (7.1)$$

这就是著名的熵增加原理。孤立系统的熵是单向地增加的,如果达到最大值,就意味着系统处于热平衡态。自然界的进化从此就可以用物理系统本身所固有的物理量的变化来说明了。

不过,如众所周知,克劳修斯的进化论实质上是退化论。在他看来,自然界将由低熵状态倒退到高熵状态,整个宇宙最终要处于热平衡状态即热寂状态。他把用来描述热运动规律的熵原理由孤立的热力学系统简单地外推到整个宇宙,显然是犯了错误。但是,克劳修斯的错误与其说是在于他预言了世界的退化,不如说是他把世界的退化趋势绝对化了;他没有看到世界上不仅有退化,而且还有前进。

但是不管怎样,由于熵概念的引进,科学已经可以用系统的熵的变化来研究物理世界的进化和物理事件的方向性,而时间已成为了物理学的事实。

第二,达尔文于 1859 年发表的《物种起源》一书以大量事实和天才的洞察力建立了科学的生物进化论。达尔文总结和概括当时的古生物学、比较解剖学、胚胎学、分类学和赖尔的地质渐变论以及他本人的实践经验所提供的大量事实,提出了他的进化论。他以变异、遗传和自然选择来解释生物的进化。生物普遍具有变异,而变异分为定向变异和不定变异。前者是不遗传的,后者是遗传的,遗传的变异可以作为选择的材料。所谓自然选择,是在错综复杂的生存斗争中,保存有利的个体差异和变异,淘汰有害的个体差异和变异的过程。没有变异就没有选择,而没有选择就没有进化。由于长期的自然选择,有利变异逐渐积累,微小变异发展成显著变异,终于形成了适应于一定生存条件的性状和新物种。这样,达尔文认为现存的一切生

物包括人类在内都是由原始单细胞生物进化而来的。他第一次科学地勾画了生物由简单到复杂、由低级到高级的进化图式。

第三,“正像达尔文发现有机界的发展规律一样,马克思发现了人类历史的发展规律”^①。马克思所发现的社会发展规律第一次以完整的形式发表在1859年的《政治经济学批判》序言里。马克思从生产力和生产关系、经济基础和上层建筑的相互关系中考察社会的运动,进而指出:“物质生活的生产方式制约着整个社会生活、政治生活和精神生活的过程。不是人们的意识决定人们的存在,相反,是人们的社会存在决定人们的意识。社会的物质生产力发展到一定阶段,便同他们一直在其中活动的现存生产关系或财产关系(这只是生产关系的法律用语)发生矛盾。于是这些关系便由生产力的发展形式变成生产力的桎梏。那时社会革命的时代就到来了。随着经济基础的变更,全部庞大的上层建筑也或慢或快地发生变革。”“大体说来,亚细亚的、古代的、封建的和现代资产阶级的生产方式可以看作是社会经济形态演进的几个时代”^②,而资本主义社会将必然向共产主义社会过渡。另一方面,马克思根据个别劳动和社会总劳动的关系,把经济形式和社会形态的演进划分为三个阶段^③:(1)自然经济,与此对应的是以人直接依赖于人为特征的社会形态,如原始社会、奴隶社会和封建社会;(2)商品经济,与此对应的是以人依赖于物为特征的社会形态,如资本主义社会(和我们现在所观察到的社会主义社会);(3)产品经济,与此对应的是以人的全面发展基础上的自由个性为特征的社会形态,即未来的共产主义社会。

波尔茨曼在他的《大众科学》中写道:“如果有人问我,我们应该

① 马克思恩格斯选集(第3卷).北京:人民出版社,1966.123

② 马克思恩格斯选集(第2卷).北京:人民出版社,1966.194—195

③ 马克思恩格斯全集(第46卷上册).北京:人民出版社,1979.104—105

给这个世纪起个什么名字,我将毫不犹豫地回答:这是达尔文世纪。”^①他被达尔文的进化论深深吸引住了,立志做一个物质进化的达尔文,并且他如愿以偿了。

由于克劳修斯、达尔文和马克思的工作,进化论在物理学、生物学和社会学中已经确立为科学。人们日益清楚地认识到,每一门科学不仅要研究对象的存在的秩序,而且要研究对象的进化的规律,只有把对象的存在纳入到它的进化中去才能完整地真正地认识对象本身。近代科学中关于世界一成不变的信条终于被彻底粉碎了,但不是在哲学的思辨中,而是在科学的事实中。

7.1.2 进化论在 20 世纪的新发展

这里,我们将主要讨论物理学和生物学领域的新发展。

先看物理学领域。克劳修斯的世界最终要达到热寂状态,但本世纪的宇宙学主流派所提供的是与此相反的世界。伽莫夫(George Gamov, 1904—1968)等人于 1940 年代末提出的宇宙大爆炸模型认为宇宙开始于高温高密度的原始火球的一次大爆炸。初期整个宇宙处于热平衡,由于高温只能存在一些基本粒子。随着宇宙不断膨胀,辐射温度及物质密度逐渐降低。当温度降至 100 亿度左右时,中子或者衰变,或者与质子结合成重氢、氦等元素。当温度降至 100 万度后,新的元素不再形成,等离子体中的物质与辐射处于平衡。当温度降至 4000 度左右时,等离子体复合成通常的气体,质子、中子、电子结合成各种原子。从此热辐射可以摆脱物质的吸引而在空间中自由传播。辐射温度继续降低,气态物质逐渐凝缩成星系或星系团,最后形成恒星及目前的宇宙。

据此,韦斯科夫(Victor Frederik Weisskopf, 1908—2002)认为,

① 普里戈金 I., 斯唐热 I. 从混沌到有序. 上海:上海译文出版社, 1987. 201

自然界有一种从无序到有序和有组织的明显趋势,从大爆炸到目前的宇宙有一系列从简单到复杂的发展阶段。宇宙将比现在更加有序,因为一切无规则的热运动都将冻结。但一切东西都将是冷的、死的和不变的。

显然,韦斯科夫的世界与克劳修斯的世界正相反对。后者认为一切运动都将转化为热,宇宙将处于绝对的无序,而前者认为一切热运动将冻结,宇宙将处于绝对的有序。但是他们都认为宇宙将处于死寂状态。那么一个死寂的宇宙将怎样才能重新活动起来呢?恐怕只得再次求助于上帝的手指。

真理或许在两个极端之间。普里戈金的耗散结构理论或许是解开宇宙进化之谜的一个途径。

耗散结构理论是普里戈金于1969年首次明确提出的。它是热力学和统计力学发展的一个新成果。19世纪人们的兴趣集中于平衡态与可逆过程。进入20世纪人们开始重视非平衡态与不可逆过程。

一个系统的存在必须以它的有序性与稳定性来标征。普里戈金首先以开放系统理论说明了负熵流可以使系统的熵减少。这是因为在时间间隔 dt 内,系统熵 S 的变化 dS 是熵流 $d_e S$ 与熵产生 $d_i S$ 之和,如式(6.22)所示。在孤立系统中, $d_e S = 0$, 故 $dS = d_i S \geq 0$; 在开放系统中, $d_e S \neq 0$, 若 $d_e S < 0$, 且 $|d_e S| > d_i S$, 则 $dS < 0$ 。这就使人们设想,在开放系中有可能出现某种低熵有序结构。

普里戈金进一步以李亚普诺夫稳定性理论研究系统的稳定性。他认为,李亚普诺夫函数在平衡态中是熵;在线性非平衡态中是熵产生,可由 $P \geq 0$ 及 $\frac{dP}{dt} \leq 0$ 的性质来判断系统稳定性;而在非线性非平衡态中是熵的二次微商 $\delta^2 S$,它具有 $\delta^2 S \leq 0$ 及 $\frac{d}{dt} \delta^2 S$ 不定号的特性。这样,稳定有序结构在一定条件下可以从非线性非平衡态中产生。

从而可知,一个开放系统可能有三种不同状况,其一是平衡态,分为稳定有序的和稳定无序的状态;其二是近平衡态,其中不能产生有别于平衡结构的新结构;其三是远离平衡态,可以产生稳定有序的动态结构,即所谓耗散结构。

根据耗散结构理论,普里戈金认为必须从抽象的普适的时空概念走向具体的有物理内容的时空概念。在他看来,有与经典力学或量子力学联系在一起的时间,有通过李亚普诺夫函数与不可逆过程相联系的时间,特别地有通过分叉理论与“历史”联系在一起的时间。一个稳定有序结构是不是耗散结构,就要考察它的历史。

这样,耗散结构理论指出了由无序走向有序的一个新途径,从而拒绝了宇宙死寂说(无论是克劳修斯的还是韦斯科夫的)。在普里戈金看来,宇宙是一个开放系统,而不是孤立系统。它不会变得日益简单,日益无序,最后达到平衡。宇宙的发展不是单向性的,它可能变得日益复杂,日益丰富多彩,形成各种新的有序结构。宇宙的历史没有自己的结束,总有新变化、新发展,是无止境的。“无论我们向哪里看去,我们发现的不是稳定性和协调性,而是导致多样性和不断增加着复杂性的进化过程。”^①

再看生物学领域。

达尔文进化论的困难在于遗传与变异机制问题。20世纪生物学最辉煌的成就是遗传学,而遗传学的发展为达尔文进化论的发展作出了最重要的贡献。德弗里斯(Hugo de Vries, 1848—1935)等于1900年重新发现孟德尔(Gregor Johann Mendel, 1822—1884)定律。摩尔根(Thomas Hunt Morgan, 1866—1945)等发现伴性遗传规律,又发现连锁、交换和基因在染色体上的直线排列等现象,从而创立了基因学说。接着,1908年哈代(Godfrey Harold Hardy, 1877—1947)

① 湛昆华等. 普利高津与耗散结构理论. 西安:陕西科技出版社, 1982. 142

和温伯格(Wilhelm Weinberg, 1862—1937)把孟德尔的分离定律应用到群体中去,用数学方法研究群体基因的分布状况,建立了群体遗传学。到了 30—40 年代,杜布赞斯基、赫胥黎(Julian Sorell Huxley, 1887—1975)等把基因学说和自然选择学说结合起来建立了现代达尔文主义进化论。50 年代以来随着分子遗传学的发展,弄清了基因是具有特定核苷酸序列的 DNA 片段,而遗传密码的发现从根本上揭开了遗传与变异之谜。这又使现代达尔文主义进化论得到了进一步发展。

现代达尔文主义进化论认为生物进化的基本因素是突变、自然选择和隔离。突变(包括基因突变和染色体畸变)是选择的基本材料。自然选择的作用就像筛子,那些不适应的突变被淘汰,那些适应的突变得以保存。突变是随机的,但选择决定了进化的方向。在个别情况下,新生的突变体比原来的类型更能适应环境,或者由于环境的变化,那些原来不适应于生存的突变体现在反而变得更适应了。在不同选择压力下,由一个单一的同源群体中发展出不同基因型的生物体,生物体之间的差别逐渐扩大,在出现了隔离机制后,彼此间基因的交换被阻止,从而形成了种群的分化。本来属于同一种群的不同群体分化成不同种群,并由于生殖隔离而彼此分开了;这时,它们即使再生活在同一地区内,互相之间已无法交换基因,也就达到了进化上的物种差别的水平^①。

在生命起源和生物进化问题上,另一个引人注目的理论是艾根从 1971 年起倡导的超循环理论。它为从分子水平上解释生命的起源和生物进化提供了新的理论模式。对此,我们将在附录中加以介绍。

^① 在 60 年代末,木村资生等人提出非达尔文主义进化论即所谓中性突变说,为从分子水平上解释生物进化作了一种新尝试,这也是一个值得注意的动向。

根据以上的介绍并考虑进化论在社会科学和思维科学(亦称认知科学)中的发展,可以把各种具体系统的进化论大致分为下列几种:

(1) 物理进化论,即关于物理世界的进化理论,其研究对象是整个宇宙、银河系、太阳系和地球的进化,以及由无机物到核酸、蛋白质的进化。

(2) 生物进化论,即关于生物世界的进化理论,其研究对象从宏观上看是由最简单的生命现象到人类的进化,从微观上看是生物体内的核酸、蛋白质的进化。

(3) 社会进化论,即关于人类社会的进化理论,其研究对象是从原始社会到未来社会的进化。

(4) 认识进化论,即关于认识的发生及发展规律的理论,其研究对象是个人、群体以及整个人类的认识进化规律。

(5) 特别值得补充的是关于上述几种进化等级的依次过渡的研究,亦即研究从核酸、蛋白质到生命的转化、从猿猴“社会”到人类社会的转化、从猿猴“意识”到人类意识的转化,等等。

原则上讲,上述几种进化论之间的相互关系是,前者的原理适用于后者,但是后者具有与前者不同的一些特殊原理;当研究后者时寻求在其中起作用的前者的原理是必要的,但是无论如何也不能把后者归结于前者,以前者来代替后者。

7.1.3 进化论发展的新阶段——系统进化论

科学在它的发展进程中产生了与宇宙进化的不同等级相对应的具体系统的进化论。现在,科学的步伐已踏进进化论发展的新阶段,那就是把上述各种具体科学的进化论综合成为系统进化论,从上述各种具体科学的进化论中抽象出能适用于各种不同系统的统一的进化原理。

系统进化论研究开始于贝塔朗菲,并已经和正在由普里戈金和哈肯等科学家深入发展,尽管他们都未曾使用系统进化论这一名称。普里戈金以将耗散结构理论从热力学领域推广到生物学和社会文化领域的方式研究了系统进化。贝塔朗菲和哈肯则直接从系统概念和各种不同系统的同型性出发研究了系统进化的某些原理。

贝塔朗菲在一般系统理论中认为无机界和有机界的进化机制是不同的。在物理世界中,基本单元的集合体构成系统,低级系统的复合体构成高级系统,如原子结合成分子,分子又结合成各种物体。高级系统不是低级系统自身发展的结果,而是各低级系统相互结合的产物。但是在有机界中存在着完全不同的系统进化规律。这里,高级系统不是各低级系统相互结合的产物,而是低级系统自身发展的结果。机体系统的进化原理被表述如下:先是原始系统发生渐进分化,而渐进分化伴随着渐进集中化;渐进分化意味着渐进机构化,而渐进集中化也就是渐进个体化,每一个体则是集中化的系统;渐进集中化过程产生出主导部分,它保证每一个体的整体可调节性,而系统等级由主导部分体现。这一原理在胚胎发育、生物进化、社会进化、心理进化等现象中普遍适用。

显然,在贝塔朗菲看来,在有机界中系统进化是通过渐进分化和渐进集中化的相互协调而进行的。这一思想十分重要,但总的说来,贝塔朗菲的描述显得过于抽象,并保留着有机界和无机界之间的鸿沟。

普里戈金的耗散结构理论在某种意义上填平了这一鸿沟。他把耗散结构理论当作“生命的热力学”。他认为:一个远离平衡的开放系统,不管它是物理系统、化学系统,还是生物系统、社会文化系统,通过与环境交换物质和能量,在反常涨落的作用下可以形成稳定有序的动态结构。他把这种耗散结构的有序称为“来自涨落的有序”。在一种耗散结构建立后,涨落由系统自组织的契机转化为破坏既有有序结构的因素,但是它又可以(或可能)把已变得不稳定的系统推

向新的结构中去。这就是系统进化过程。

哈肯在更广泛的范围内研究系统进化问题,创立了协同学。他认为:一个开放系统既可以处于平衡态,也可以处于非平衡态。一个处于平衡的开放系统,或一个处于非平衡的开放系统,在一定条件下都可以生成有序结构。例如,超导体和铁磁体是一种有序结构,就连液体和固体结构也在一定程度上是有序的。而它们都可以在热平衡条件下从无序状态中产生。因此有序结构的产生并不是非远离平衡不可;自组织过程既可以发生在非平衡系统中也可以发生在平衡态系统中。因此,平衡相变和非平衡相变之间有着深刻的类似性。原来专用于热平衡态的一些方法,也可以用于非平衡态,如原来专用于一维超导体的一些方法也可用于激光。

在自组织过程中,能量以完全无规的形式输运给系统,但在这些能量的作用下系统可以形成有规则的宏观结构,而宏观结构的规则性基于大量要素的有序排列。为解释大量要素赖以形成有序结构的协同作用,哈肯采用序参量概念。序参量标征系统的宏观模式,决定系统的类型和有序度。系统的整体行为是由一个或几个序参量的行为决定的,因而甚至很复杂的系统也可以在一定条件下表现出有规则的行为。

哈肯进一步指出:各种完全不同的系统由于参量的变化而发生不稳定从而经过不稳定点时显示出深刻的相似。这种不稳定性最终产生新的宏观时空花纹。在很多情况下,系统进化的机制可表述如下:接近不稳定点,可以区别稳定的和不稳定的集体模。稳定模被不稳定模役使并可以被消去。剩下的不稳定模就成为决定系统宏观行为的序参量。所得出的序参量方程可按一般性质分成几类,其中有些方程相当于那些制约着热平衡态物理系统一级相变和二级相变的方程,但也出现诸如描述脉冲或振荡的新类型。随机力和确定力(偶然性和必然性)之间的相互作用驱使系统从旧态进入到新位形,并决定哪个新位形得到实现。

这些研究足以说明我们有希望建立一种适用于各种不同类型系统的统一的系统进化论。现在,系统进化论所要揭示的是系统自身或一般系统的产生、变化和发展过程;它试图在各种具体系统从无序到有序、从一种有序到另一种有序、从有序到混沌的进化过程中,揭示适用于各种具体系统的一般进化原理,阐明系统进化趋势、系统进化机制、系统进化模式和系统进化判据等^①。我要指出的是,虽然各方面的研究已经取得了不少进展,而且有些问题似乎已经得到了解

① 这里,我想简要地介绍一下“系统进化论”(Systems Evolutionary Theory)概念的产生过程。这是许多人多年思考的结果。长期以来,克劳修斯所提出的物质进化方向和达尔文、马克思所提出的生物—社会进化方向之间的对立使我迷惑不解。但是,对哲学一元论的信念和对自然—社会的直觉,使我坚信应该有某种统一原理支配着物理世界和生物—社会领域。这就使我不仅学习熵理论、生物进化论和唯物史观,还涉猎当时已有的各种与进化有关的理论,如贝塔朗菲的一般系统理论、普里戈金的耗散结构理论、哈肯的协同学、艾根的超循环理论、拉兹洛的广义进化论以及其他自组织理论。所有这些理论使我开阔了眼界。但是,我总觉得这些理论的名称本身限制它们成为系统进化的普遍理论,而它们在内容上的局限性则更为明显。耗散结构理论归根结底是一种热力学理论,在它的展开中并没有使用系统学的基本概念,而它在解释社会文化系统的进化时主要是基于热力学概念的套用或借用。协同学虽然试图揭示适用于物理或非物理系统的统一的进化原理,但是它也未能摆脱其背景的限制,它的展开仍以物理系统为主,而其名称在字面上的限制使它更难适合于解释充满冲突和纷争的社会文化系统。超循环理论本来就不是作为一种普遍理论来倡导的,它是一种生物进化论。上述的几种理论通常自称或被称为“自组织理论”。这是流行最广泛的名称。暂且不说“自组织”一词尚未被很好地定义,仅就社会文化系统的进化而言,历史上的众多事件和我们眼前的大量事件显然不是“自组织”的产物,而是自组织和他组织的共同产物。一个民族被另一民族的奴役,长官意志下的人群流动,甚至罪犯的自杀行为等,都不是自组织的结果。“广义进化论”在很多方面的确与系统进化论等价,但是就系统学的一个分支而言,我宁愿采用“系统进化论”一词。

“系统进化论”一词最早产生于1982—1983年间,“系统进化论初探”一文发表在1983年全国系统科学与现代化建设学术讨论会(大连会议)上。那次会议上的绝大部分论文所讨论的是系统概念、系统观点、系统方法及其应用等问题。这反映当时我国系统理论界的实际情况。当时,虽然国外科学界已广泛研究系统进化问题,中国物理学界已经非常重视非线性非平衡问题,钱学森先生已多次强调上述几种自组织理论的重要性,但许多系统研究者尚未重视系统进化问题。经过多年的学习和研究,1986年我写了“系统的进化”一文,它成为1987年出版的《系统科学》一书第五章的基本内容。在阐述系统进化论时,我广泛采用了前人的研究成果,并在许多问题上和许多观点的阐发上作了自己的尝试。在本书中,读者会了解到这些。

决,但是几乎所有问题仍在继续研究当中。

7.2 若干基本范畴

为了建立和发展系统进化论,一方面要对对象世界中的各种具体系统的进化进行深入研究,另一方面则要在理论上进行综合和概括。为此,我们需要研究和使用与系统进化有关的一系列的重要范畴,如封闭性和开放性,他组织与自组织,量变与质变,渐变与突变,对称与对称破缺,有序与无序,平衡与非平衡,线性与非线性,可逆与不可逆,偶然性与必然性,内因与外因,竞争与协同,等等。

在这些范畴中,一部分已在哲学或其他科学中有了较深入的研究,这就需要在系统进化论中使之具体化或用系统概念重新表述;另一部分却未曾有过认真的研究,这就需要从头做起。这些研究显然是系统进化论的一个重要组成部分,它不仅有助于揭示系统进化机制,而且为进一步的研究提供概念工具。下面,我们要逐一讨论上面所列举的各对范畴。

7.2.1 开放性与封闭性

任何具体系统都具有封闭性和开放性,即是说任何具体系统既是封闭的,又是开放的。从经验上这是不难理解的。在我们的经验世界中,绝对不可能找到哪怕是一个绝对封闭的或绝对开放的具体系统。从理论上,系统的封闭性和开放性也是不难理解的。

任何具体系统的存在以其封闭性作为一个必要条件。当我们把对象世界的某一部分作为系统分离出来时,用边界来割断了系统与周围世界之间的某些联系。也就是说,系统的定义本身就规定了任何具体系统对于某些性质和关系而言,或者对于某些量而言,必须是封闭的,并以封闭性维持自身的存在。实际上这种封闭性是对系统

有限性的另一种表述方式。

但是,任何具体系统又不可能是完全封闭的。当对象世界的一部分被分割下来当作一个系统时,这只是认识论和方法论上的权宜之计。整个对象世界是一个整体,它的各部分之间存在着永恒的相互作用和相互联系。实际上,系统的特定性质和关系同周围世界的其他性质和关系有着各种各样的联系,系统的要素与环境的其他因素之间存在着直接的或间接的联系,系统与环境之间存在着物质、能量或信息方面的输入、输出或输入—输出。

既然任何具体系统都不可能是完全封闭的,就可知道任何具体系统都具有开放性,对于某些量而言必须是开放的。一般来讲,系统与环境总是以某种方式进行着组元的交换、运动的交换或信息的交换。对物质系统而言,从热力学第二定律可知,这种交换不仅是系统保持内在有序性、维持其生存的必要条件之一,而且是能向更复杂更高层次系统进化的必要条件之一。在概念系统中,系统与环境之间在组元、运动和(或)信息方面的交换也是系统的生存和进化的必要条件之一。从古希腊科学到牛顿力学,从牛顿力学到相对论和量子力学的发展过程足以说明这一点。

但是,任何具体系统又不可能是完全开放的。完全的开放意味着系统丧失了任何规定性,系统的边界已不复存在,系统与周围世界已无界线,系统与环境已无区别;原来的系统已丧失了独立存在的可能性。例如,当两个邻国之间的共同边界被完全开放的时候,即两国人民可以完全自由来往,完全自由地到邻国去从事政治、经济、文化活动的時候,这两个国家的独立存在就会名存实亡,从而或迟或早地合并为一个国家。当一个国家用武力吞并邻国,消除共同边界时,结局也是一样。对一个系统来说,完全的封闭与完全的开放都意味着自取灭亡。

从上可知,无论从系统的内在规定性而言,还是从与环境的关系

而言,任何具体系统都是封闭性和开放性的辩证统一。当然,对各种具体系统来说,开放什么或封闭什么,开放到什么程度或封闭到什么程度,何时开放或何时封闭,会有相当大的区别。这要根据系统的性质、环境的性质以及系统与环境之间关系的特性决定。但是,任何具体系统都不可能是完全封闭或完全开放的。对一个具体系统来说,开放性和封闭性本身是属于它的本质属性,而不是属于研究的策略或方法。我们可以说,一个系统的成功依赖于开放与封闭之间的适当协调,而系统研究的成功与否依赖于如何适当地调节开放性与封闭性之间的关系。

就与系统进化的关系而言,封闭性和统一性是同源的,而开放性和多样性是同源的。在系统的动态发展中,封闭性趋使系统走向无序或僵化。无序和僵化显然是两个正相反对的趋势,但是它们又紧紧连在一起,因为无序意味着系统的瓦解,而僵化又是走向最终瓦解的一个短暂的插曲。不过,至少在一段有限时间内,封闭性会使系统遭受其中的一种结局。另一方面,在一定时间范围内,开放性为系统提供自维持、生长、发展和进化的可能性,但是由于内部或外部的原因,开放性也不能消除系统最终趋于无序或僵化的可能性。总之,系统是在它本身所固有的封闭性和开放性的对立统一中生存和进化的。

7.2.2 自组织与他组织

在系统进化研究中似乎没有一个概念要比“自组织”用得更广泛。据说,康德最早使用过“自组织”一词^①,艾什比于1947年使用过“自组织”(self-organizing)一词^②,1954年信息论专家们召开的一

① 吴彤,曾国屏. 自组织思想:观念演变、方法和问题. 见:许国志(主编). 系统科学与工程研究,87

② William Ross Ashby, http://academickids.com/encyclopedia/w/wi/william_ross_ashby.html

次会议上又有人使用过“自组织”一词^①。现在,这一概念已从信息论、控制论领域扩展到物理、生物以及社会经济系统等几乎所有的复杂系统。但是,人们对“自组织”的理解并不一致,甚至根本不同。下面,我们先看关于“自组织”的几种观点。

首先,有人认为,自组织分为两种,一是控制论意义下的自组织,另一是耗散结构、协同学意义下的自组织。

就控制论意义下的自组织而言,最有名的是艾什比的自组织概念。他把自组织过程分为两种,其一是从无组织到有组织的转变,其二是从组织较差到组织较好的转变。但是,艾什比和福斯特(Heinz von Foerster, 1911—2002)曾论证过,由本身内部自行组织的自组织系统是没有的,即是说,没有一个系统能在与外界无关的情况下进行自组织,原因在于一个系统要变成有组织的系统,就必须从它的环境中吸取这种组织性。如环境没有秩序,系统就不可能进行自组织。

与此不同,耗散结构理论与协同学意义下的自组织是指系统在涨落作用下自行改变内部结构的过程。哈肯曾指出:如果系统在获得空间结构、时间结构或功能结构的过程中,没有外界的特定制约,就说系统是自组织的。这里,“特定”一词是指那种结构和功能并不是外界强加给系统的,而且外界是以非特定的方式作用于系统的。例如,当一群工人中的每个工人按工头发出的外部命令有秩序地活动时,称之为他组织;当他们在没有外部命令的情况下,靠某种相互默契协同工作,则称之为自组织。

不难看出,上述的两种“自组织”概念的含义是不同的。耗散结构理论与协同学意义下的自组织是名符其实的自组织,但艾什比所

^① 今田高峻,自己組織パラダイムの潮流。見:公文俊平,高原康彦(編),一般システム研究の成果と展望。横浜:GSR研究会,1987。255—270

说的“自组织”实际上并不是自组织,而是他组织。在艾什比那里,系统的组织化靠的是外界组织性的输入,也就是说,系统结构的变化依赖于系统外界的某个控制者。当然,我们并不否认受控系统也有可能是自组织系统。例如,人构造一个系统,通过适当的约束,使系统以自组织方式产生与所施加的约束没有直接关系的功能,如在激光器中所看到的那样。

第二,有一种非常流行的观点认为,自稳过程依赖于负反馈,自组织过程依赖于正反馈,或者说,负反馈导致自稳,正反馈导致自组织。具体地说,负反馈可使系统消除与稳定状态的偏差,回到稳定状态,而正反馈可使涨落放大,从而导致自组织。

但是,所谓反馈,其最基本的含义是将系统输出的一部分送回输入端。就此而言,正反馈与负反馈之间并不存在本质上的区别。基于同样的输出信息,既可使系统趋于稳定,亦可使系统走向自组织。因此,问题不在于反馈的正负性质,而在于如何使用输出信息。

如我们在本书第四章所述,负反馈分为发散型负反馈、稳定型负反馈和收敛型负反馈,其中会使系统趋于稳定的只是后两种负反馈,而前一种负反馈不仅不能使系统自稳,反而会使系统趋于崩溃,或者会使系统进行自组织。正反馈也分为发散型正反馈、正稳定反馈和正收敛反馈。其中,发散型正反馈在一定条件下可使系统走向自组织,但稳定型正反馈和收敛型正反馈却不能使系统进行自组织,只能使系统趋于稳定。

第三,能否在逻辑上严格地表示自组织过程,也是一个长期讨论的问题。艾什比曾论证,不可能在逻辑上严格地阐述自组织过程。但是,在现实世界中确实存在着自组织现象。为解释这个问题,贝特森(Gregory Bateson, 1904—1980)指出:问题在于逻辑是与时间无关的,但因果关系包含着时间。当多个因果关系构成一个循环时,如果把因果关系变换为与时间无关的逻辑关系,就出现自相矛盾,产生

无法用逻辑关系来说明的悖论。例如,可用恒温器说明如下:

若恒温器的开关被接通,则冷却器开始工作。

若冷却器工作,则房间温度下降。

若房间温度下降,则恒温器的开关被切断。

若恒温器的开关被切断,则房间温度上升。

若房间温度上升,则恒温器的开关被接通。

恒温器的各个工作阶段表示着“若…则…”的因果关系。如果把
这些关系变换成与时间无关的逻辑关系,就出现自相矛盾,如:

若恒温器的开关被接通,则恒温器的开关被切断。

若 P 则非 P。

恒温器的各个工作阶段由各个因果关系连成一个循环,在逻辑
上出现自相矛盾。但是,在现实中恒温器的工作机制并不包含任何
逻辑矛盾。这是因为其中包含着时间上的先后关系。

艾什比和贝特森的讨论似乎表明了形式逻辑的局限性。看来,
自组织过程的形式化不可能由形式逻辑来完成,但这也不能成为否
认自组织现象实在性的根据。另外,从字面上看,所谓自组织是指系
统根据自己的机制改变自己的过程。但是这决不意味着系统在没有
外界影响下进行自组织。实际上系统的自组织总是在外界的影响下
进行的。

通过以上的讨论,我认为:如果系统在没有外界关于正在或即将
形成的系统内部模式的任何现成信息输入的情况下,通过适当的物
能流,自发地形成某种时间模式、空间模式或时空模式,就称之为自
组织。如果在系统的组织化过程中有关正在或即将形成的系统内部
模式的信息来自系统外部,就称之为他组织。例如,在贝纳德(Henri
Bénard, 1874—1939)花纹的形成等大量现象中,外界并没有提供有
关系统模式的任何信息,因此这些现象是自组织现象。所以,被称为
自组织的无序—有序、有序—有序、有序—混沌的转变是新模式的自

创生过程,是新信息的自创生过程。但是,基于他组织的组织化过程不是新模式、新信息的自创生过程,而是系统根据外部信息的指令进行组织的过程。例如,当我们用机器零件组装一台机器的时候,这些零件的移动和结合全靠我们的调遣,而我们是按照装配图执行的。因此,从零件到机器的转变过程,是一种他组织过程。

在系统进化研究中自组织显得要比他组织重要。但是在讨论具体系统的进化时,我们必须根据具体情况判断所发生的是自组织过程还是他组织过程,或者是两者的结合,尤其在社会文化系统的进化中,所出现的现象往往是自组织与他组织的统一过程。实际上自组织与他组织的区别不是绝对的,而是相对的。两者的区别,一是与系统边界的划定有关,二是与所选取的时间尺度有关。当引起他组织的信源被纳入到系统内部时,整个系统的变化有可能被当作自组织。在某个时间范围内被当作他组织的现象,在较长的时间范围内可能就被当作自组织现象的一个部分。例如,整个社会历史过程是一个自组织过程,但是各个历史事件或者被看作是他组织现象,或者被看作是自组织与他组织的复合现象。

7.2.3 量变与质变

量与质、量变与质变的关系问题,不仅是一个哲学问题,而且是许多科学中的一个基本问题。这里我们仅就其中若干问题进行简略的讨论。

量与质两个概念的正确定义是首先由黑格尔给出的,他指出:“质首先就具有与存在相同一的性质,两者的性质相同到这样程度,如果某物失掉它的质,则这物便失其所以为这物的存在。”^①

“质是与存在同一的直接的规定性,与即将讨论的量不同,量虽

① 黑格尔. 小逻辑. 北京:商务印书馆,1980. 188

然也同样是存在的规定性。但不复是直接与存在同一,而是与存在不相干的。且外在于存在的规定性。”^①

黑格尔的定义的正确性是人们所公认的,遗憾的是,在一些论著中,从字面上解释量与质的概念是一回事,运用这两个概念去分析实际中的量与质、量变与质变是另一回事。这里,我仅就量变质变规律研究中若干基本问题进行讨论。

问题之一:一对象的组成部分的排列次序是不是该对象自身的量的规定性?

人们通常对此作肯定的回答。但是只要我们把问题的提法改为“一系统的各要素的排列次序是不是该系统自身的量的规定性”,就不难看出把对象自身的量与其组成部分的量相混淆是错误的。根据黑格尔关于质与量的定义,在系统中,各要素的排列次序就要素而言,并且仅就要素而言才是量的规定性,但就那些要素构成的系统而言却不是量的规定性,宁可说是质的规定性,因为各要素排列次序的总和形成系统的结构,而与要素相统一的结构规定并表征系统的质。例如,考虑水分子 H_2O , 其中 H 与 O 的排列关系仅就 H 与 O 而言才是量的规定性,就水分子 H_2O 本身而言却不是量的规定性,而是质的规定性。

问题之二:在讨论量和质的概念时,其中的量是指对象自身的量,那么在讨论量变与质变时,其中的量应该是指对象自身的量,还是指其组成部分的量,或是同时指这两者?

首先,看一对象的质变能否用对象本身的量的变化来说明。就一对象而言,温度、体积、数量、空间位置等都是它本身的量,而不是其组成部分的量。这里有些量(如温度)的变化可以用来说明对象的质变,例如自黑格尔以来人们不厌其烦地用水的温度变化来说明水的聚集状态的变化。但是另一些量(如数量、空间位置)却不能用来

^① 黑格尔,小逻辑,北京:商务印书馆,1980,202

说明对象的质变。例如,在人们熟知的麦粒和麦堆的例子中,麦粒的数量不断增多,在一定条件下就会形成麦堆。但这决不意味着麦粒本身的质发生了什么变化。一般地说,一对象本身的数量增减,并不导致该对象的质变。同样地,一对象的空间位置的变化也不会导致该对象的质变。一对象不管把它放在天堂,还是抛入地狱,它的质将依然如故。一颗麦粒是被捏在黑格尔的手心里还是被拴在牛顿的振子上(牛顿确实这么做过),与它本身的存在是不相干的。总之,如果要用对象自身的量的变化来说明该对象的质变,首先必须识别出能引起质变的量与不能引起质变的量;对象自身的量不能成为用来说明质变的统一的普适量。

其次,看一对象的质变能否用其组成部分的量的变化来说明。

实际上,我在本书的第五章已经回答了这个问题。系统的质取决于要素的质与量,因此要素的量变会导致系统的质变。换言之,一对象的质变是可以用其组成部分的量变来说明的。

这里可能存在的惟一疑问是,这种说明是否全面,亦即是否存在一些质变,不能用对象的组成部分的量变来说明。由于对象自身的量可分为能引起质变的量(如温度)和不能引起质变的量(如数量),这一疑问就可改述为:在对象自身的量中,那些能引起质变的量能否都以其组成部分的量来表示。回答是肯定的。例如,在物理领域,根据统计理论,温度、压力等可以用与大量微观粒子运动相对应的统计平均值来表示;温度被看作是大量粒子平均动能的综合表现,压力被看作是无数微观粒子撞击器壁所发生的动量变化的总和,物体的不同聚集状态从而就可以用分子间的平均距离和给合力的变化来说明。总之,任意对象的任一质变都是在其组成部分的量变中实现的。

因此,在讨论量变引起质变时,一个方便的方式(并且是我们目前所知道的最方便的方式)是,以对象自身的质来表示其中的质,以对象的组成部分的量来表示其中的量。就是说,所谓量变引起质变,

可方便地表示为对象的组成部分的量变引起该对象的质变。

问题之三：一般认为，“量变引起质变的基本形式有两种：一种是数量的增减引起质变，另一种是排列组合的变化引起质变。”^①那么应当怎样认识组成部分的运动量变化与对象的质变之间的关系呢？

首先要指出的是，上述引文中的“数量的增减”或“排列组合”应当是指研究对象的组成部分的“数量的增减”或“排列组合”。其次，当讨论量变引起质变时，是需要考虑研究对象各组成部分的数量增减和(或)排列次序的变化，但同时还必须考虑其运动量的变化。例如，水分子 H_2O 与过氧化氢 H_2O_2 的区别不能简单地归结为过氧化氢比水分子多一个 O，必须看到 H 与 O 在这两种分子中有不同的空间排列(图 7—1)，还要看到两种分子内的键能大小是不同的。这既可以从该结构图中直观地看出，也可以从下列反应式中得知：

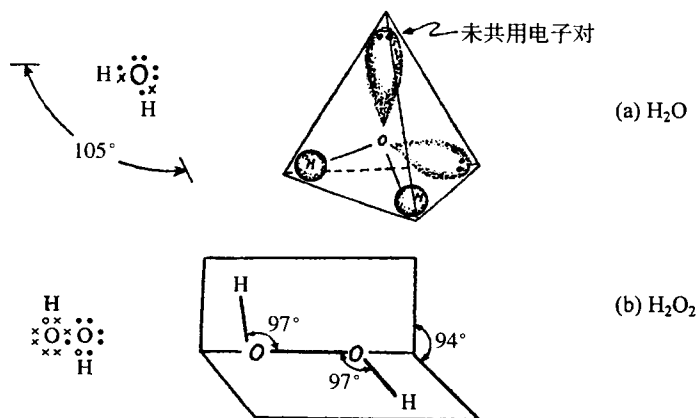
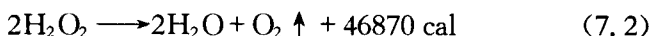


图 7—1 H_2O 与 H_2O_2 的结构

① 上海市高校《马克思主义哲学基本原理》编写组，马克思主义哲学基本原理，上海：上海人民出版社，1982



应当认识到运动量既不能归结于数量,也不能归结于排列次序。在某些情况下,可以认为“分子的各种不同的组合”是“基于已经传给物体的或多或少的运动的量”^①,但是如同我们在讨论手性系统时所指出的那样,系统在其要素的运动量相同的情况下也可以具有不同的结构。因此,一般地说,数量、运动量与排列次序是三个相互独立的量。由此可以说,组成部分的运动量的变化引起对象的质变,也应被看作是量变引起质变的基本形式之一。

问题之四:在以上的讨论中,我们已看到:在讨论量变引起质变时,最好用对象的组成部分的量变来说明该对象的质变,而这里的量分为三个独立的基本量即数量、运动量与排列次序。这三个因素加上组成部分的质,共有四个因素决定对象的质。那么,这四个因素在规定对象的质时所起的作用是怎样的呢?

这里我要以系统质与要素的四个因素之间关系来展开讨论。在要素的四个因素中,要素的质作为一个独立因素而规定系统的质。不同质的要素理所当然地构成不同质的系统。至于表示要素之量的三个因素,它们作为表示量的规定性的不同侧面,彼此是独立的,即它们不能相互替代,可以独立地变化。但是,当它们作为规定由这些要素构成的系统的质的因素时,它们能否分别作为独立因素而规定系统质是尚需讨论的。

要素的数量与运动量并不是规定系统质的独立因素。要素的不同数量与不同运动量只能为系统质的差异提供可能性,但是其本身未必为系统质的差异提供现实性。例如,许多麦粒不是把它们堆起来,而是沿着平面铺起来,那么数量再多的麦粒也不能形成麦堆。再如,如果把乙烯 C_2H_4 与乙炔 C_2H_2 的差异单纯地视为乙烯比乙炔多

① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 47

两个 H,也是不妥的。乙烯决不是乙炔加二个氢原子,应当看到两者在化学结构上的差别,见图7—2。所以,要素的数量或运动量的变化有可能引起系统的质变,但是这些变化本身并不能直接引起系统

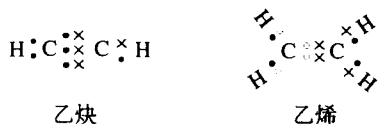


图 7—2 乙炔与乙烯的结构

的质变。只有这些变化引起各要素排列次序的变化,亦即只有通过各要素排列的变化,才能改变系统的结构,才能导致系统的质变。要素的数量和(或)运动量的变化为

系统的质变提供可能性,而要素的排列次序的变化使可能性转化为现实性。

但是,要素的排列次序完全可以作为一个独立因素,即独立于要素的数量与运动量而规定系统的质,如在手性系统中所看到的那样。

在一般情况下,要素的质、数量、运动量与排列次序在作为规定系统质的因素起作用时,它们之间有着错综复杂的相互关系。从总的趋势上看,要素数量的增加为其组合方式数目的增加提供可能性。图 7—3 中可知,随着要素数量的增加,不同形状图形数就急剧增加。恩格斯早在他那个时代,通过同系列的碳化物认识到这一点,他指出:“在这些系列中,黑格尔的规律还以另外的形式出现在我们面前。较低的同系物只允许原子有一种相互排列。但是当结合成一个分子的原子的数目,达到对每一系列来说是一定的大小时,分子中的原子

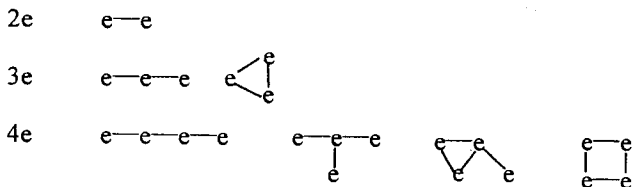


图 7—3 要素数目与系统模式

排列就能够有多种方式;于是就能出现两种或更多的同分异构体。”^①

从这些事实中能得出一个重要结论:要素的排列次序不仅如在手性系统中那样作为一个独立因素而规定系统的质,而且又是作为一个能动的因素而规定着产生系统质变的多样化的可能性。

7.2.4 渐变与突变

系统的变化有渐变与突变之分。顾名思义,渐变是指渐次的变化,而突变是指突然急剧的变化。无论在自然界、人类社会还是在人的思维中都可观察到渐变和突变。例如,在物理学上,物态在相变点之前的变化为渐变,而在相变点上的变化为突变;在生物学上,物种进化过程中充满着渐变与突变;在地质学上,突变论与渐变论的争论最终在两者的统一中求得了合理的答案;在社会学上,不仅有某一社会结构下的渐变,而且有社会结构的根本转变时期的突变;在科学发展中既有常规科学时期的渐变,又有范式转变时期的突变;在人的思维发展中,既有知识的渐次积累,也有突发性的创造。

渐变与突变是一对很平凡的概念,但它们常与其他一些范畴相混淆。这里,我们简要地讨论渐变与突变同其他几种范畴之间的关系。

一、渐变与突变同量变与质变之间的关系

通常,人们把渐变理解为量变,突变理解为质变。虽然这种理解适合于解释大量的现象,但是从概念的内涵上讲,这种理解是错误的。渐变与突变概念所要揭示的是相继的系统状态之间的关系问题,而量变与质变概念所要把握的是变化与系统存在之间的关系问题。渐变可为量变,亦可为质变。例如,某些非晶态物质,如玻璃、橡

^① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 50—51

胶、沥青等,从固态到液态的转变,是一种渐变,但同时又是一种质变过程。同样,突变可为质变,亦可为量变。例如,在下暴雨时,水库的储水量突然增加,这是突变,但不是质变,而是量变。反过来说,量变既可为渐变亦可为突变,质变既可为渐变亦可为突变。例如,下毛毛

渐变/量变	渐变/质变
突变/量变	突变/质变

图 7—4 渐变、突变与量变、质变

细雨时水库储水量的增加和下倾盆大雨时的水库储水量的增加都是量变。一盆水可通过渐次的蒸发过程而变成水蒸气,亦可通过沸腾而变成水蒸气。总之,渐变与突变同量变与质变之间的关系有四种情况,如图 7—4 所示。

二、渐变与突变同连续变化与不连续变化之间的关系

通常,人们把渐变理解为连续变化,突变理解为不连续变化。在大量现象中的确存在着渐变与连续变化、突变与不连续变化之间的这种表观上的等价性。但是,从概念的内涵上讲这种理解也是错误的。例如,水库储水量的渐变既可通过连续的水流来实现,亦可通过不连续的水流来实现。突变也是这样,它可以是连续的亦可以是不连续的。反过来,连续变化既可为渐变亦可为突变,不连续变化也可

渐变/连续变化	渐变/不连续变化
突变/连续变化	突变/不连续变化

图 7—5 渐变、突变与
连续、不连续变化

渐变/慢变化	渐变/快变化
突变/慢变化	突变/快变化

图 7—6 渐变、突变与
慢变化、快变化

三、渐变与突变同慢变化与快变化之间的关系

通常,人们把渐变理解为慢变化,突变理解为快变化。这种误解也反映了渐变与突变概念的微妙之处。从概念的内涵上讲,渐变与慢变化、突变与快变化并不等价。判断一种变化是渐变还是突变,是基于系统本身的变化过程的结构,而不是基于其时间行为;判断一个变化是慢变化还是快变化,则是基于变化所需时间的长短,与所选取的时间尺度有关。由于所选取的时间尺度不同,渐变与突变可被看作是慢变化或快变化。这样,就有四种情况,如图 7—6 所示。

在系统进化中,既有渐变又有突变。人们在相当广泛的领域发现,不同类型的系统在渐变过程中表现出很强的个性,但在发生突变的关节点附近有一些共同特性如对称破缺、临界涨落、临界慢化等支配着突变过程。这样,目前人们把引起质变的突变当作一个中心问题来研究。

7.2.5 对称与非对称

对称与非对称是一对普遍而深刻的概念。在日常生活中对称常被视为美、和谐、庄重,在科学上对称性的发现常被认为是科学进步的重要标志之一。但是,这种传统观念已经过时了。如果说在服装行业各种不对称的图案和设计已成为一种时髦,那么在科学上非对称性的重要性已不亚于对称性,尤其在进化研究中,从对称到非对称的转化即对称破缺已被认为是不可缺少的过程。

一般地说,所谓对称,是指某一对象(如几何图形、代数式、逻辑关系、物体或运动等)在某种变换下的不变性。稍微严格地说,如果存在恒等变换 T ,对象 A 在变换 T 下不变,则称 A 关于 T 是对称的。如果某对象关于某变换是对称的,则称该对象具有对称性。在与之相反的情况下,即 A 在 T 下有变,则称 A 关于 T 是非对称的。

对称可分为空间对称与时间对称。空间对称又可分为外观的形象对称和内部的结构对称。例如,在结晶学中,空间对称分为旋转、反映、倒反、旋转倒反、螺旋轴、滑移面等对称类型。时间对称表示对象在时间关系上的对称。例如,四季在每年的重复出现,单摆的周而复始的运动等表示对象的时间周期对称性,而被抽去了时间方向性的对称性,如牛顿运动方程的时间反演不变性,则是时间反演对称性。

一事物的对称性不是固定不变的,在一定条件下可增可减。例如,当氯化钠从溶解或熔融的状态变成固态即结晶态时,由于发生各向同性到各向异性的转变,对称性减小,结晶态的氯化钠只有几种对称晶型。一事物的对称性与对它的考察方式也有关。例如,橡胶制品,其宏观状态的对称性大小取决于其形状,如轮胎中心对称,胶鞋左右对称。但是如果考虑气体分子的排列,由于分子排列的无规则性,其对称性就很大。

在对称性的变化中,最引人注目的是在系统进化过程中发生从对称到非对称的转变即对称破缺,或者从对称性大的状态到对称性小的状态的转变即对称的部分破缺。例如,在宇宙演化过程中,大爆炸后的初期存在着“无穷多”个对称元素,“任何”对称操作都是允许的。但是随着膨胀和温度下降,正物质和反物质、强相互作用和弱相互作用、弱相互作用与电磁相互作用的对称性逐步破缺,现在只剩下了正负电荷等少数对称性。在生物进化中,从单细胞生物到人类的进化也是对称性逐步减小的过程。不仅如此,生命的存在也靠着非对称性。没有非对称性,就不可能有物质循环,而没有物质循环,就不可能有生命。

在大量现象中人们已发现,对称破缺发生在分叉点上。例如,在图 7—7 所示的系统进化过程中,在临界点 λ_c 发生分叉,也就是说系统从不稳定分支 C 所示的均匀状态发展到稳定分支 A 或 B 所示的

不均匀状态。从理论上讲,出现 A 或 B 的几率是相等的,但是实际中往往只能观察到其中的一种,不是 A 就是 B。如在生物大分子中所看到的那样。

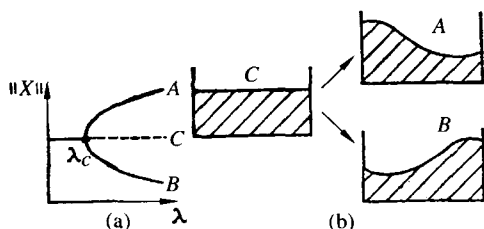


图 7—7 分支图和非均匀动态

当科学把自己的视野

局限于不变的秩序时,科学研究的最终目标是从非对称中发现对称,如从牛顿力学到狭义相对论、从狭义相对论到广义相对论的发展以及在基本粒子物理学的发展中所看到的那样。但是,当科学的视野从不变的秩序扩展到可变的秩序时,从对称到非对称的转变就成为科学研究的一个新的中心,正像从耗散结构理论、协同学以及混沌理论中所看到的那样。

7.2.6 有序与无序

如前所述,序原先是一个日常用语,在科学领域至今还没有普适的定义,常有歧义性。尤其对于与模式有关的序,尚无度量方法。但是,对于与微观粒子的概率分布有关的序,已有了较多的研究。

有序和无序是相对的概念。当存在着两个对称性不同的微观状态时,对称性高的状态称为无序状态,对称性低的状态称为有序状态,或者前者称为有序度小的状态,后者称为有序度大的状态。在物理学上,这两种状态之间的变化称为相变。在相变研究中,基本的问题之一是在一定条件下会出现何种有序状态。例如,铁磁相、铁电相、超导相、超流相是典型的有序状态。用来表示有序状态特征的参量称为序参量。在一定条件(温度、压力等)下,系统的序参量取特定的值。因此,相变过程中序参量发生变化。

例如,看铁磁-顺磁相变。在低温铁磁相中,原子磁矩的取向趋于一致,温度越低,磁矩排列得越有序;在高温顺磁相中,原子磁矩的

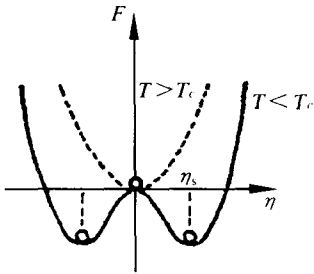


图 7—8 无序与有序

取向趋于无规则。当顺磁体变成铁磁体时发生自发磁化,对称破缺,出现从无序状态向有序状态的转变,并有序参数的增加。设序参数为 η , 系统的自由能为 F , 可视之为 η 的函数, 那么就得出图 7—8。

当 $T > T_c$ 时, $F = F(\eta)$ 在 $\eta = 0$ 处取最小值, 系统的状态是无序的。

当 $T < T_c$ 时, $F(\eta)$ 在 $\eta = \eta_s \neq 0$ 处取最小(极小)值, 出现有序状态。可知, 当系统从无序状态转化为有序状态时, 序参量增大。

上面所考察的是空间序。实际上, 根据不同的标准, 可观察到各种各样的序。例如, 根据时空分布特征, 可将序分为空间序(如晶体结构)、时间序(如生物钟)和时空序(如树木的年轮); 根据系统的层次性, 可考察不同层次上的序, 如微观序、中观序和宏观序; 根据序的特征, 可考察与概率分布有关的序和与模式有关的序。

对于各种各样的序能否用统一的测度来衡量, 目前还是一个未得解决的问题。我们在不同学科看到序的不同的度量, 如统计力学中的熵、相变理论和协同学中的序参量、信息论中的信息量。我们还看到人们常用对称性的来讨论有序程度的大小。在微观序或与概率分布有关的序的研究上已取得了初步的成果, 但是在与模式有关的序的度量问题上还未能取得任何成功。例如, 晶体是一种具有对称性的有序结构, 如晶体发生对称破缺, 即可观察到无序状态的出现。又如, 一座左右对称的建筑物, 如果其左边或右边的一部分遭到破坏, 就发生对称破缺, 这时我们所看到的是无序的出现, 或有序度的减少。因此, 当我们笼统地谈论对称与序的关系时, 就不难发现:

对称性大的状态既可以是无序状态(如气体),亦可以是有序状态(如一只球),对称性小的状态也既可以是无序状态(如晶体对称破缺的状态),亦可以是有序状态(如在铁磁体中所看到的那样)。对称破缺既可以导致有序,亦可以导致无序。这就表明,对称性不可能成为序的普适量度。

不过,无论怎样,在系统序进化研究中,我们总得研究系统的无序-有序转变、有序-有序转变和有序-混沌转变,揭示这些转变的机制。人们已在许多具体科学领域取得了成就,但是为了找出这些转变的普适判据,也许还要走很长一段路程。

7.2.7 平衡与非平衡

将在本章第4节和第6节讨论这一对范畴。

7.2.8 线性与非线性

将在本章第6节讨论这一对范畴。

7.2.9 可逆与不可逆

本书第5章第5节和第6章第2节已讨论过时间与可逆性、不可逆性之间的关系、可逆性与不可逆性之间的关系以及微观可逆性与宏观不可逆性之间的关系。这里,我们要进一步讨论可逆性与不可逆性的概念。

系统过程可分为可逆过程和不可逆过程。当一个系统的状态发生变化时,如果在对外界环境不留下任何变化的情况下能返回到原来的某个状态,就说这种状态变化是可逆的。为了实现可逆过程,在其整个变化过程中系统必须处处处于平衡态。在实际问题中,为了连续地取平衡态,引起系统状态变化的外参量必须非常缓慢地变化。从这个意义上讲,可逆过程是准静过程。例如在热力学系统中,当可

用可逆过程来连结系统状态 A 与 B 时,这两个状态的熵差为

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{\Delta Q}{T} \quad (7.3)$$

其中 ΔQ 为与温度 T 的热源相接触时系统所吸收的热量。

与此不同的状态变化过程是不可逆过程。当系统从状态 A 变化到状态 B ,再从状态 B 变化到状态 A 时,如果包含有不可逆过程,就会对外界环境留下某种变化。在非准静过程中,系统与外界的热平衡和系统内部的热平衡不可能一直维持不变,因此整个过程是不可逆的。现实中的状态变化都是不可逆过程,准静过程即可逆过程的实现需要无限长的时间,因此是一种理想过程。例如在热力学系统中,根据热力学第二定律,

$$S_B - S_A > \int_A^B \frac{\Delta Q}{T} \quad (7.4)$$

可知,在绝热变化中不可逆过程朝着熵增大的方向进行。在等温等容变化中,不可逆过程朝着赫尔姆霍茨自由能减小的方向进行。在等温等压变化中,不可逆过程朝着吉布斯自由能减小的方向进行。

严格的可逆过程在现实中并不存在。通常所说的可逆过程实际上是将可逆过程中的不可逆因素忽略不计之后的近似。例如,振子的可逆摆动忽略了因摩擦而引起的热的损失(不可逆变化)。谁都知道,振子的摆动最终会停下来的。

如果只考虑状态 A 与状态 B 之间的转换,即不考虑是否给环境留下某种变化,那么我们可以观察到两种情况。其一,是从状态 A 到 B 的转化与从状态 B 到 A 的转化都是可能的。例如,在振子的周期振荡中只要提供相当于所耗散能量的外加作用,那么“可逆过程”能继续保持下去。另一种情形是,从状态 A 到 B 的变化是可能的,但从状态 B 到 A 的变化是绝对不可能的。在大量复杂系统中这是最普遍的现象。例如,生物体的生长和进化、社会的演进、工程材料的

老化等过程就属于这种情形。系统进化的总的方向是与时间的方向相一致的,是单向性的。这就是系统的历史。实际上,对振子的周期振荡来说,由于振子的物性限界,永恒的可逆运动是不可能的。我们应当抛弃可逆性的世界观,树立不可逆性的世界观;前者是狭隘的脱离实际的世界观,而后者是活生生的现实的世界观。

7.2.10 偶然与必然

科学和哲学从它们的原始时代起就把偶然性和必然性当作一对基本范畴来研究。最基本的问题在于偶然性与必然性被看作永远互相排斥的两个范畴,两者之间的辩证关系未被广泛认识。有些人片面强调必然性,认为世界上的一切都是必然的,而另一些人却片面强调偶然性,认为世界上的一切都是偶然的。就算很明智的观点也认为:世界上的各种事物、各种现象、各种过程不是偶然的,就是必然的。世界被分成两部分,一是纯粹偶然的,另一是纯粹必然的。

但是,哲学依赖思辨的力量,早已指出了偶然性与必然性的辩证关系。正如恩格斯所指出:“和这两种观点相对立,黑格尔提出了前所未闻的命题:偶然的东西正因为是偶然的,所以有某种根据,而且正因为是偶然的,所以也就没有根据;偶然的东西是必然的,必然性自己规定自己为偶然性,而另一方面,这种偶然性又宁可说是绝对的必然性(《逻辑学》第2册第3篇第2章:《现实》)。自然科学把这些命题当作奇异的文字游戏、当作自相矛盾的胡说抛在一旁,它自己在理论中一方面保持沃尔弗形而上学的思想空虚,认为一件东西不是偶然的,就是必然的,但是不能同时既是偶然的,又是必然的,另一方面又坚持同样思想空虚的机械的决定论,一般地在口头上否认偶然性,以便在每一个特殊情况下实际上承认偶然性。”^①

① 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971. 198

但是,要在科学领域正确地阐述偶然性和必然性之间的辩证关系并非易事。在科学领域,现在通常用确定性描述必然性,用随机性描述偶然性,因此偶然性与必然性的关系就表示为随机性和确定性的关系。例如,牛顿力学是确定性描述的典范,而统计力学是随机性描述的典范。前者是“一一”对应的,一组确定的初值给出一个确定的轨道;如知道某一时刻的运动状态,就可确定其过去和未来。后者是“多一”对应的,一个平衡态对应于瞬息万变的众多微观状态;不同的初态均可达到相同的平衡态,因此无法从平衡态判断它的历史。

确定性描述又分为两种。一是关于保守系统的描述。只要在确定性方程中不加与时间有关的外力,这些方程就都描述保守系统,刻画时间上可逆的运动。另一是关于耗散系统的描述。按照通常的理解,只要适当地给定初始条件和边界条件,确定性方程就应当给出确定的结果。但是,人们在耗散系统研究中发现,即使在初值和边界条件被确定的情况下,一些确定性方程也会给出不确定的结果,如在30多年来的混沌研究中所看到的那样。因此,这里的确定性是包含着随机性的确定性,是在一定条件下可产生或可转化为随机性的确定性。这种随机性称为内在随机性。

内在随机性的发现使人们认识到随机性也分成两种,即外在随机性和内在随机性。外在随机性是人们所熟知的。例如,一个数学摆的运动不能完全由力学方程确定。当数学摆处于正上方的不稳定平衡位置时,就无法根据确定性方程描述摆的运动。如取此位置为摆的初值,它就会永远静止在那里。但这一初值的任何微小偏差,都会使摆向左侧或向右侧运动。为了描述摆的运动,外界环境的随机性的引入就成为不可避免的。这种外在随机性的特点在于:可能出现随机性的初值区域在相空间中的测度为零;为计入随机性,原方程中必须外加随机项,如随机初始条件、随机参数或随机外力等。与此不同,某些从表观上看完全确定的方程,由于内在随机性,在不需附加任何随机项

的情况下亦可表现出随机行为,而且导致这种随机行为的初值范围或参数范围在相应的相空间或参数空间中取非零测度。

完全确定性的描述和完全随机性的描述都是理想化的极限,体现某种无穷过程。如果说一个质点的轨道是完全确定的,这就意味着测量精度为无穷大。只要允许任意小但有限的公差 ϵ ,就可构造随机过程,使其在公差 ϵ 的观测精度下与确定性轨道无所区别。相反,一个完全随机的过程应当满足无穷长的统计检验。设在 $(0,1)$ 区间上取 N 个均匀分布的随机数。只有 N 无穷大,才能算是完全随机性的描述。只要 N 不是无穷大,就可设计某种确定性过程来产生 N 个随机数,使其同样好地通过全部随机性检验。实际上在科学中所研究的并不是无穷过程,而是有限过程。因此,现实中的问题既不是完全确定的,也不是完全随机的,而是确定性与随机性的统一。这里的结论不仅适用于基于外在随机性的描述,而且适用于基于内在随机性的描述。

内在随机性的发现使人们在确定性和随机性的相互关系方面的认识发生了一次革命性的变革,确定性与随机性的辩证关系第一次由科学自身的力量得到了适当的描述。但是,必然性并不等价于确定性,而偶然性也不等价于随机性,因此即使完全弄清了确定性和随机性的关系,我们还不能说完全弄清了偶然性和必然性的全部关系。尽管如此,由于内在随机性的发现,人们已在彻底弄清偶然性和必然性之间关系的正确方向上迈出了一大步。

7.2.11 内因与外因

毛泽东说道:“外因是变化的条件,内因是变化的根据,外因通过内因而起作用。”^①这是关于内因与外因之间关系的众所周知的观

① 毛泽东选集(合订本). 北京:人民出版社,1966. 277

点。但是,关于内因与外因之间关系确有许多问题尚待研究。这里,我也不准备系统地讨论这些问题,只想谈论与系统进化有关的若干问题。

其一,我们要从鸡蛋和石头的例子谈起。在一定条件下鸡蛋可变成鸡子,而无论什么样的条件都不能使石头直接变成鸡子。这说明二者的根据不同。但是,如无适当条件,鸡蛋也不能变成鸡子。因此,就鸡子的获取而言,无法使鸡蛋变成鸡子的那种条件和无法使石头直接变成鸡子的根据是等价的。不仅如此,石头在一定条件下亦可间接地“转变”成鸡子:石头可以卖钱,钱可用来买鸡。

更重要的是,按照热力学第二定律,物质系统如被孤立,最终就达到平衡态。这表明,如无与外界环境的物能交换,作为“内因”的物质系统内部各种特性都不可能阻止这种退化。如果系统是开放的,那么就有可能产生与系统自身的内在特征密切相关的或者取决于系统自身的内在特性的新的有序结构。由此可知,在封闭系统中,任何内因都不能阻止系统的退化;在开放系统中,外因成为系统的内因作为内因起作用的一个必要条件。因此,外因与内因的形而上学的对立是错误的。

其二,在大量复杂系统中,内因与外因的区分并非易事。例如,马克思认为,生产力和生产关系、经济基础和上层建筑的矛盾推动社会的发展。这是正确的。但是,当人们把上述的两对矛盾当作社会发展的内因,把自然环境当作社会发展的外因时,就有一些问题需要澄清。

生产力包括人的社会的因素和自然的因素。其中,自然因素至今在种植业、渔业、采矿业等领域居于非常重要的地位。当日本人靠着加工工业发财时,中东人靠着丰富的油田发了财。生产力的一部分属于社会,另一部分则属于自然界。例如在种植业中,粮食生产过程可分为耕地、播种、施肥、灌溉、收割、脱谷等劳动过程和种子的发

芽、农作物的成长、成熟等自然过程。显然,从谷物种子到大量谷物的转变,即使用价值的增值主要不是发生在劳动过程中,而是发生在自然过程(光合作用)中;使用价值的生产者与其说是劳动,不如说是自然界,劳动所起的作用主要是以各种方式影响自然过程,使自然过程进行得更加顺利,以增加使用价值的增值量或增值速度。因此,我们不能认为生产力就是社会内部的因素,生产力与生产关系的矛盾只是社会内部的矛盾。

孟德斯鸠(Charles de Secondat, de Montesquieu, 1689—1755)和普列汉诺夫(Georgii Valentinovich Plekhanov, 1856—1918)等曾研究过自然环境对社会发展的作用问题。虽然我们不能说自然环境及其变化能直接决定社会结构及其变化,但是不容忽视的事实是:如无适当的自然环境,人类就不可能出现,人类社会就不可能存在,而人类社会的持续存在乃是它的各种变化的前提。自然环境的变化严重地影响着社会的变化,并且有时候甚至起着决定性的作用。在自然环境的严重污染正在威胁人类及整个地球生物的今天,强调这一点有着重要的现实意义。

其三,我们来看系统进化的数学描述(详见后面几节)中的一两个问题。在系统进化方程中有状态变量和控制变量。状态变量的变化依赖于控制变量,即是说系统内部的变化依赖于外界的作用。这虽然表现出这种描述方式的某种局限性,但是也能反映外界作用对系统的变化有多么重要。

此外,一个系统在什么样的外界条件下进入临界点,将会出现哪些分支,是取决于系统自身的特性。但是,在临界点处,系统将进入哪一个分支,却是取决于涨落。例如,在标准状态下当水温降到 0°C 时并不产生冰,但只要给它一个小小的扰动,就会出现结冰。这就充分说明外因的重要性。

从以上几方面的讨论可知,系统进化过程是内因与外因共同作

用的过程。在每一个具体情况下,何者起何种作用,何者起决定性的作用,必须具体地分析。

7.2.12 协同与竞争

系统各要素之间的相互作用告诉我们,片面强调各要素之间的协同关系或竞争关系都是错误的。我们可从哲学上论述这个问题。但是在这里我们将只用一两个简单例子来进行说明。

首先,考虑系统由两个要素组成并且每个要素的增长(生长)仅依赖于它本身的情形,那么贝塔朗菲所考察过的系统方程,见式(1.5)可简化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= a_1 Q_2 \\ \frac{dQ_2}{dt} &= a_2 Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

解得

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= c_1 e^{a_1 t} \\ Q_2 &= c_2 e^{a_2 t} \end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

消去 t , 得

$$Q_1 = b Q_2^\alpha \quad (7.7)$$

其中 $\alpha = a_1/a_2$, $b = c_1/c_2^\alpha$ 。

式(7.7)是有名的异速生长方程。该方程适用于生物学的广泛领域。它表示,某一特征的值 Q_1 是另一特征的值 Q_2 的幂函数。例如在形态发生学中,某器官的长度(或重量)通常是另一器官的长度(或重量),或者所论生物体总长度(或总重量)的异速生长函数。在社会学上,该方程表示关于国民收入分配的帕雷托定律,其中 Q_1 表示个人所得量, Q_2 表示国民收入总值, b 与 a 是常数。

如果考虑系统中各部分之间的相互作用,即 $a_{j \neq i} \neq 0$, 那么情形

就变得复杂。但是不管怎样,变速生长方程所表示的是系统内部相互协同的各部分之间的竞争或各部分与系统总体之间的竞争。

又如,在植物、动物和微生物组成的共生系中,三者之间存在着协同与竞争。在简化模型中,动物吃植物,微生物分解动物,而植物以动物被分解后的产物作为养料,结果动物又重新获得食物。因此在共生系中,一类生物的生存以另一类生物为必要条件,不同类生物互相吃掉对方,又依赖于对方。这种敌对共生关系则是生物共生系能长久生存的根据所在。当然,共生系能长久生存的又一个必要条件是它的开放性,即从环境吸收所需物能,并向环境排放其废物废热,如图 7—9 所示。

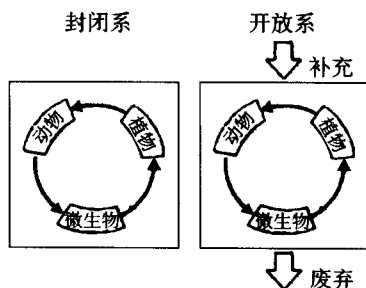


图 7—9 共生系的流

对于一个系统来说,各部分之间的协调或协同固然是非常重要的,因为这种协同关系使得系统成为一个整体或统一体。但是,引入组成部分之间竞争的概念并不导致自相矛盾。正如贝塔朗菲所指出:事实上这两个明显矛盾的陈述都是系统的本质;每个整体都以它的诸要素之间的竞争为基础,并以“部分之间的斗争”为前提^①。进而,他把部分之间的竞争或斗争看作是 15 世纪德国哲学家尼古拉〔库萨的〕所提出的“对立物的一致”这一命题在实在中的一种表现方式。由此可知,前些年出现过的将矛盾学说与系统观点、矛盾方法和系统方法对立起来的种种说法是何等的幼稚。那种错误误解的产生一方面是由于对矛盾学说的错误理解,另一方面是由于对系统观点的错误认识。

① Bertalanffy L. v. *General System Theory*. New York; George Braziller, Inc. 1973. 66.

总之,系统内部各要素之间的协同与竞争不仅是系统赖以存在的基础,而且是系统赖以进化的基础。不同系统之间的协同与竞争则是不同系统赖以共存和进化的前提。我们应该在系统内部各部分之间的协同和竞争中,在不同系统之间的协同和竞争中认识系统的存在,揭示系统进化的一般原理。

7.3 系统进化方程及其讨论

7.3.1 典型现象

当我们所研究的是由大量要素(或子系统)组成的系统的时候,我们无论在自然科学、社会科学、思维科学或工程技术领域都可以发现这些系统在从无序到有序、从一种有序到另一种有序、从有序到混沌的转变过程中,在宏观尺度上显示出惊人的类似性,不管其要素是光子、原子、分子、细胞、神经原、器官、动物或人。在一定条件下这些要素之间的合作可以产生空间结构、时间结构或时空结构。为了揭示不同系统宏观转变的一般原理,需要对一些典型现象作深入细致的研究。这里,我们介绍在系统进化研究中常用到的几种典型现象。

一、贝纳德花纹

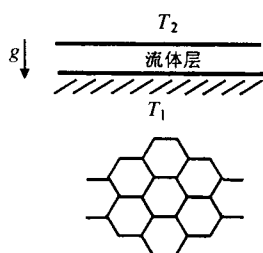


图 7—10 贝纳德花纹

当一个系统从一种模式转变为另一种模式时,后一种模式的生成以前一种模式的不稳定为前提。贝纳德花纹如同其他模式一样,也是通过这种不稳定性而生成的。

在图 7—10 中,在不变的重力场中,在上下两个界面之间有一水平液层。若下界面的温度保持 T_1 ,上界面的温度保持 T_2 ,则上下界面的温度梯度 $\Delta T = T_1 - T_2 > 0$ 。液体不断从下表面吸收热量,又不断从上表面放出热量。这是一个

开放系统。

当 ΔT 很小时, 流体静止, 热以传导方式输运, 热流向上。

当 $\Delta T > \Delta T_c$ (ΔT_c 为一临界值) 时, 俯视流体, 出现大量六角形对流元胞。在六角形中心流体向上, 在边缘流体向下, 流线接近三角形。

当 $\Delta T > \Delta T'$ ($\Delta T'$ 为另一临界值) 时, 出现周期振荡, 并过渡到湍流。

二、泰勒花纹

我们在本书 5.4 考察过在两个同轴圆筒间运动的流体。当固定外圆筒而改变内圆筒转速时, 流体的运动模式随内圆筒的转速而发生变化。当转速较低时, 流体因与圆筒的摩擦力而形成与内圆筒同轴的流线。当转速增加到一临界值时, 流体在轴向的横层中形成周期地向内和向外运动的滚动模式。当转速增加到第二个临界值时, 滚动便以一确定的基频振荡。在更高的转速下, 滚动以两种频率振荡, 而随着转速的增加可观察到各种复杂的滚动振荡模式。最后则产生无规则的混沌运动, 如图 7—11 所示。

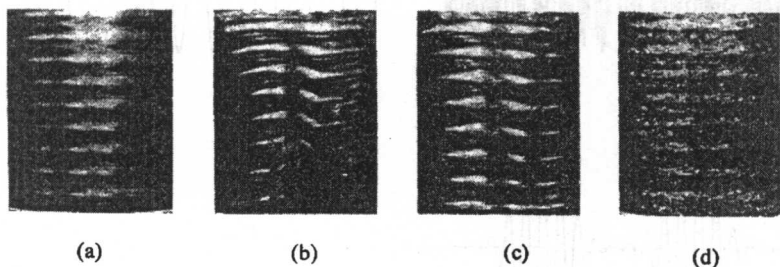


图 7—11 泰勒不稳定性序列

(a) 滚动形式; (b) 滚动开始振荡; (c) 一种较复杂的滚动振荡运动; (d) 一种混沌运动。

Haken H. *Advanced Synergetics*. Berlin: Springer - Verlag, 1983. 3

三、激光

激光器是一种能发射相干光的光源, 但激光作用在星际空间中

也自然发生。典型的激光器是一根晶体棒或装有气体的玻璃管。这些激光器利用受激辐射原理使光在这些激发的工作物质中放大或发射(振荡)。当工作物质中的原子受到外界激发或泵浦时,激光器便发射出光波。据泵浦功率不同,光波的宏观模式也就不同,即场强 $E(t)$ 的振荡模式就不同。

当泵浦功率较低时,激光器像普通的灯,发出不相干的光波。如果我们能听到光,这时所听到的就是噪声,这时场强随时间的变化如图 7—12(1)所示。

当泵浦功率增大到一个临界值时,激光器的噪声被单色光取代。这意味着各原子发出纯粹正弦光波,而这反过来又意味着各个原子以完全关联的方式活动,见图 7—12(2)。

当泵浦功率增加到第二个临界值时,激光器周期地发出很强的短脉冲,如图 7—12(3)所示。

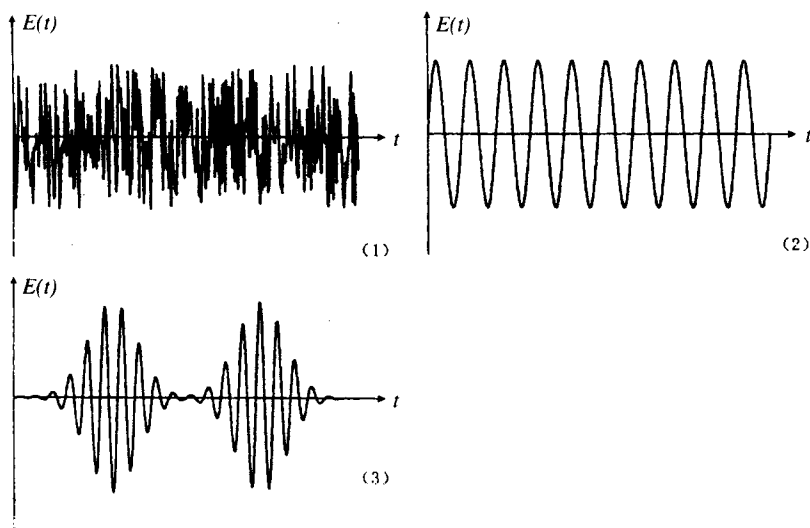
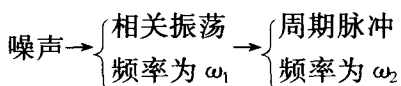


图 7—12 激光场强 $E(t)$ 作为时间 t 的函数

Haken H. *Advanced Synergetics*. Berlin: Springer - Verlag, 1983. 7

这样,我们有下列不稳定性序列:



即

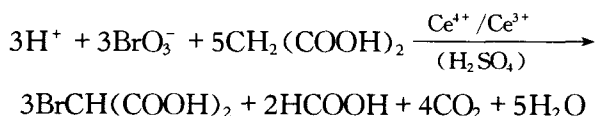
非周期振荡 $\rightarrow$ 1 种频率 $\rightarrow$ 2 种频率。

在不同条件下,光辐射还会变为不规则的“混沌”或“湍流”,频谱也变成宽带。

四、贝洛索夫-扎鲍廷斯基反应

化学振荡现象也相当引人注目。其中我们可以看到时间模式、空间模式或时空模式的自发形成。

例如,将 $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$, KBrO_3 , $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$, H_2SO_4 和几滴指示剂相混合搅拌后倒入试管并摇动,这时在试管中进行的就是著名的贝洛索夫-扎鲍廷斯基反应。丙二酸在催化剂 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 的参加下被溴酸所氧化:



驱使这个反应进行的能量来自丙二酸与由它分解而产生的最终产物即二氧化碳和蚁酸的化学能之差。重要的是,在反应过程中由于中间产物 HBrO_2 作为自催化剂促进反应的进行,而另一中间产物 Br^- 作为控制因素抑制过分的自催化作用,结果 Ce^{3+} 与 Ce^{4+} 的量发生周期振荡。这是一种时间模式,其时间行为如图 7—13 所示。试验中我们所观察到的实际情形是,在反应物倒入试管并摇动的一开始,整个液体就显示出红 $\rightleftharpoons$ 蓝振荡。红色表示 Ce^{3+} 过多,蓝色表示 Ce^{4+} 过多。如果系统是封闭的,由于丙二酸被耗尽,振荡最终会消失;如果系统是开放的,由于新的反应物不断得到补充,最终产物不断被取出,振荡就可以持续下去。

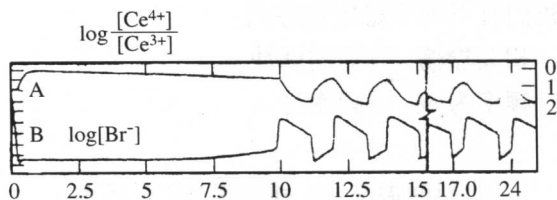


图 7—13 B-Z 反应中浓度 $\log[\text{Br}^-]$ 和 $\log[\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}]$

对于时间关系的电位测量图像

尼科里斯 G. 等. 探索复杂性. 成都: 四川教育出版社, 1986. 15

如果在不摇动化学反应物的情况下观察贝洛索夫-扎鲍廷斯基反应, 就可看到红蓝交错的同心圆或涡状的彩色图样, 而这个图样也处于不断的红 $\rightleftharpoons$ 蓝振荡中, 如图 7—14 所示。

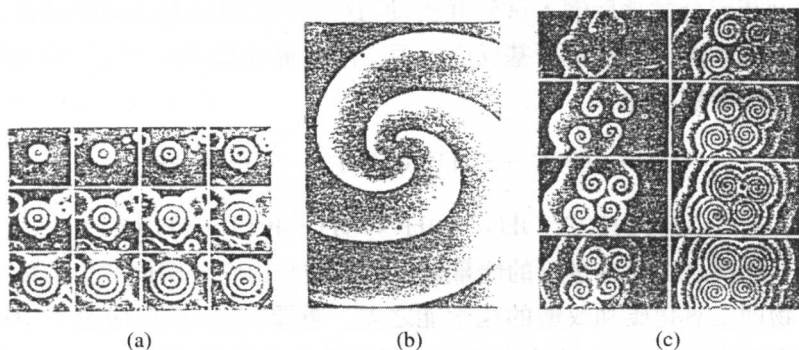


图 7—14 B-Z 反应物二维层中的波的传播

(a) 靶形构型; (b) 涡旋形; (c) 多支涡旋形

尼科里斯 G. 等. 探索复杂性. 成都: 四川教育出版社, 1986. 19

五、捕食者—被捕食者关系

在同一生态环境中, 如果不同物种以相同食物为生, 各物种的前程将由达尔文的“适者生存”原理来决定; 如果不同物种的食物互不相同, 则它们有可能共存共荣。

人们在实际生活中观察到了物种数量的时间振荡。例如, 亚得

里亚海里不同种鱼群的周期变化,或加拿大的野兔和山猫的数目在时间上的变化等。野兔以植物为生,而山猫以野兔为生。

当山猫很多时,野兔被大量吃掉,于是山猫的食物减少。结果,山猫的数目就减少。山猫数目的减少就容许野兔数目增加,这样一来山猫又有了较多的食物,于是山猫的数目又将回升。因此山猫和野兔的数目显示出有趣的周期变化,如图 7—15 所示。

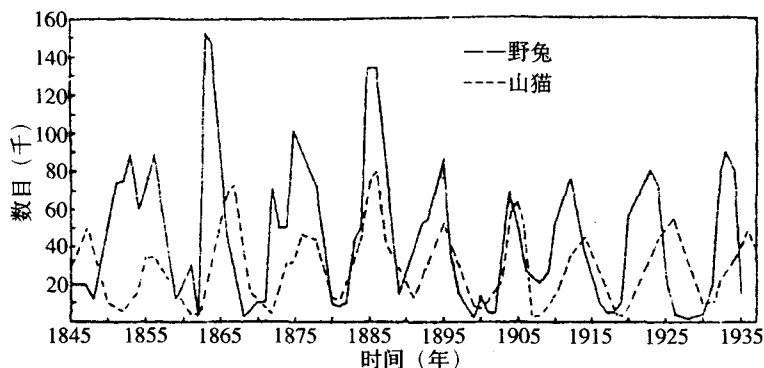


图 7—15 山猫和野兔数目的周期变化

Haken H. *Synergetics*. Berlin; Springer - Verlag, 1983. 11

六、社会模式同社会变化与社会稳定性的关系

社会模式一方面与社会变化有关,另一方面与社会稳定性有关。社会变化与社会稳定性之间又有四种情况,即:(1)变化小,稳定性小;(2)变化大,稳定性小;(3)变化大,稳定性大;(4)变化小,稳定性大。与此相对应,可观察到四种社会模式,见图 7—16。

变化性 \ 稳定性	稳定性	
	稳定性小	稳定性大
变化大	(2)激进状态	(3)理想状态
变化小	(1)无政府状态	(4)保守状态

图 7—16 变化与稳定性

与(1)情况相对应的社会模式是无政府状态,它反对任何形式的社会权力,只重视“自动平衡”。与(2)情况相对应的是激进状态,它为了变化而不惜一切代价。激进行为可以是反动的,也可以是进步的,这取决于朝哪个方向变化。与(4)情况相对应的是保守状态,它主要追求的是维持现状。与(3)情况相对应的是理想状态,即在变化中求稳定,在稳定中求变化。我们在不同国家中可观察到所有四种社会模式,也可以在一个国家的不同历史阶段观察到这四种社会模式。

除了这些广为知道的实例之外,还可从其他学科领域找到系统宏观模式的产生和变化,例如在物理学中有等离子体的不稳定性、更氏振荡器和隧道二极管宏观模式转变;在工程领域有某些材料的后期压曲模式和颤动;计算机科学中有计算机的自组织、机器的模式识别;在经济学中有充分就业和非充分就业之间的转变;生物学上有生物体的形态发生与生物进化;社会学上有舆论形成的宏观模式等。在社会、文化或科学等系统中所发生的是较抽象的宏观模式,诸如思想、概念或范式。

在所有这些实例中,我们已经看到:这些由大量要素(或子系统)组成的系统在其某些条件(控制变量)变化时,就可以发生无序—有序、有序—有序或有序—混沌的宏观转变,还可以显示出宏观模式的变化序列。

一个系统可以从均匀的、无序的、静止的状态进入不均匀的但很有序的动态,或者进入几种可能有序状态中的一种,还可能进入无规则的运动状态即混沌状态。那些处于有序状态的系统可能处于不同的稳定状态,如单稳态、双稳态或多稳态。在有序稳态中,系统可以单频率或不同频率(准周期频率)发生各种振荡。再者,还会形成各种空间模式,如蜂巢形结构、波或螺线。这些结构可能以动态方式靠经过系统的不断的能流或物质流来维持,例如在流体力学中所看到

的那样。在另一些情形下,结构先是以动态方式形成,但最终却发生“凝固”,结果以静态方式维持,例如在结晶发生中所看到的那样。

在所有这些情况下,我们所研究的是系统从一状态到另一状态的宏观转变,或者说是从一种系统到另一种系统的进化过程,而这些转变都是能在宏观尺度上导致新结构的各种质变过程。

7.3.2 系统进化方程

系统进化的一般理论是从各种具体系统进化的研究基础上概括出来的,而人们在系统进化研究中所追求的一个目标是能够从数学上描述系统进化的过程、机制与结果。当然,在实际研究中,也不排除先从数学上演绎出一些在经验现象中尚未观察到的系统进化过程、机制和结果。

一、系统描述

系统进化的数学描述基于系统的数学描述。我们知道:系统描述,从描述手段上可分为普通语言描述(亦称语言描述)和数学语言描述(亦称数学描述),从描述方法上可分为定性描述和定量描述,在描述内容上可分为内部描述和外部描述。

外部描述亦称功能描述或输入—输出描述。在外部描述中,通过各要素的输入—输出关系,求得整个系统的输入—输出关系。一要素(或系统)的输入转换为其输出的转换机制,通常用所谓传递函数来表示。所谓传递函数是指输出的拉普拉斯变换与输入的拉普拉斯变换之比。如果已知系统各要素的联结方式和传递函数,可求得系统的传递函数。利用传递函数,不必求解系统的微分方程,就可从系统的输入求得系统的输出,亦可从系统的输出推知系统的输入。

内部描述亦称结构描述,是指用各状态变量及它们之间的相互关系即用一组状态方程描述一个系统。在某一时刻 $t = t_0$, 状态变量

组的值 $q_1(t_0), q_2(t_0), \dots, q_n(t_0)$ 决定系统在该时刻的状态。如果以此作为初始状态, 并给出 $t \geq t_0$ 时的输入值, 就能用状态变量组的值 $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$ 来表示该系统在任一时刻 $t \geq t_0$ 的状态。通常所用的系统内部描述是一阶微分方程组或差分方程组。

原则上讲, 系统的内部描述和外部描述可以相互转化, 既可由状态方程求出传递函数, 亦可由传递函数求出状态方程。这正是我们在本书第三章所讲的系统结构与系统功能的相互转换关系在数学上的表现。

此外, 我们知道, 系统的数学模型通常是二阶或高阶微分方程。就传递函数或状态方程同系统微分方程的关系而言, 如果已知系统的传递函数或状态方程, 就能得出与之对应的系统微分方程; 如果已知系统微分方程, 也就能得出其状态方程和传递函数。

在系统进化研究中, 主要使用状态方程和微分方程。这是因为: 传递函数广泛应用于线性系统的描述, 但对非线性系统它受到限制, 而状态方程和微分方程既能用于线性系统, 也能用于非线性系统。

这里, 状态空间和相空间的概念也是不可缺少的。我们把用 n 个状态变量作为分量而构成的向量 $\mathbf{q}(t)$ 称为系统的状态向量, 记为

$$\mathbf{q}(t) = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{bmatrix} = [q_1, \dots, q_n]^T$$

进而, 我们把状态向量的所有可能值的集合称为状态空间。在状态空间中, 系统的每一状态都表示为一个点, 其坐标为 $(q_1, q_2, \dots, q_n)$ 。这个点代表着系统的给定状态, 称为代表点。

用状态空间研究系统行为的方法是一种很有效的研究方法。但是我们不可能在任意的一个状态空间里有效地研究一个动态系统的行为。如果状态空间的坐标是任意选取的, 那么这个系统的运动可

能是不可预测的。这是因为在状态空间上由某一点表示的位置可对应着不同的代表点轨迹。

为此,相空间的引入就成为必要。相空间也是一种描述系统运动状态的空间。在相空间中系统的运动能表示为互不相交的轨迹,使得在不变的外界作用下,系统的每个初始状态都唯一地确定系统的运动过程。

相空间的坐标叫作相坐标。相空间中的每个点都由其相坐标表示,称为相点。每个相点都代表着系统的一种运动状态。反之,系统的每一种运动状态在相空间中都有一个相点。当系统从一种运动状态开始,经过一段时间后变为另一种状态时,这一变化在相空间中的表现为从一个相点移到另一个相点。相点在相空间中的连续移动可画出一条曲线,称为相迹或相轨道,它反映系统的运动规律。任何系统的相空间都完全为其相轨道所充满,即通过这个空间的每个点都有一条轨道。表现系统运动的相轨道族称为相图。在实际的相图中通常为简便起见只画出部分轨道族。

不能把系统在相空间的运动轨道和它在真实空间的运动轨道混同起来。应记住相空间是一种抽象的概念空间,是为研究和计算方便而设计的一种数学空间。有了这种理解,才能真正理解相图的含义。例如,一只船相对于其纵轴的阻尼振荡的轨道在相图中表示为一条盘旋的螺线,而它相对于其纵轴的无阻尼振荡的轨道在相图表示为一椭圆。

二、两个实例:罗特卡-沃尔特拉方程和布鲁塞尔器

人们已在相当广泛的领域用状态方程或微分方程讨论过系统进化。这里介绍两个简单的理论模型。其一是生态学上有名的罗特卡(Alfred James Lotka, 1880—1949) - 沃尔特拉(Vito Volterra, 1860—1940)方程,其二是普里戈金等人开发的布鲁塞尔器(Brusse-lator)。

1. 罗特卡-沃尔特拉方程

在生态学上,两个物种之间的生存斗争可分为两种,一是两个物种围绕同一种食物或同一生存空间而进行的斗争,另一是被捕食者—捕食者关系。与此对应,有两种数学模型。

(1) 当两个物种围绕有限的同一食物或空间进行生存竞争时,两个物种个体数的变化遵循下列方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= r_1 N_1 \left(\frac{K_1 - N_1 - \alpha N_2}{K_1} \right) \\ \frac{dN_2}{dt} &= r_2 N_2 \left(\frac{K_2 - N_2 - \beta N_1}{K_2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7.9)$$

其中, t :时间; N_1, N_2 :两个物种的个体数; r_1, r_2 :两个物种的自然增长率; K_1, K_2 :两个物种单独增殖时的饱和密度; α, β :两个物种的竞争系数; $\alpha/K_1, \beta/K_2$:一物种的增殖被另一物种受阻的比率。对方程组的讨论导致下列四种可能结果:

当 $\alpha > \frac{K_1}{K_2}, \beta > \frac{K_2}{K_1}$ 时,据最初密度,最后只有一个物种生存下来。

当 $\alpha < \frac{K_1}{K_2}, \beta < \frac{K_2}{K_1}$ 时,两个物种共存。

当 $\alpha < \frac{K_1}{K_2}, \beta > \frac{K_2}{K_1}$ 时,只有第一物种生存下来。

当 $\alpha > \frac{K_1}{K_2}, \beta < \frac{K_2}{K_1}$ 时,只有第二物种生存下来。

(2) 被捕食者—捕食者关系(如图 7—15 所示)可表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= r_1 N_1 - c_1 N_1 N_2 \\ \frac{dN_2}{dt} &= c_2 N_1 N_2 - d_2 N_2 \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

其中, N_1 :被捕食者个体数, N_2 :捕食者个体数, r_1 :被捕食者的自然

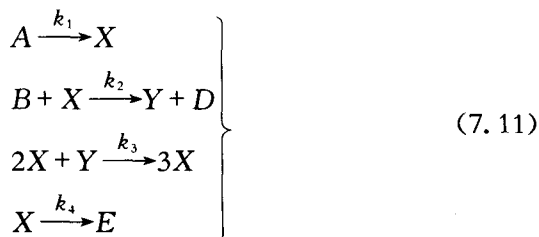
增长率, d_2 : 捕食者在不存在被捕食者时的减少率, c_1 : 表示被捕食者逃避捕食者的效率的常数, c_2 : 表示捕食者获取食物的效率的常数。

在这个模型中, 捕食者与被捕食者的个体数绕着一个平均值发生周期振荡。我们已在雪兔和山猫的例子中看到。

如果比较上述两种情况, 就不难发现: 两个物种争夺同一有限资源的竞争在某种意义上要比被捕食者—捕食者的关系即一物种的一部分被另一物种吃掉的关系更为残酷。在争夺有限资源或生存空间的斗争中, 一个物种灭绝的可能性要比两个物种共存的可能性大得多, 而在被捕食者—捕食者关系中, 两个物种虽然进行血腥的争斗, 但不致于使弱者灭绝, 它们能共存下去。人类的兴起已经或正在使一些物种灭绝, 而不同国家、不同民族之间围绕地球上有限资源或生存空间而进行的争斗往往导致惨无人道的战争, 使弱小国家、弱小民族已经灭亡或趋于灭亡。这是人类尚未完全摆脱其动物性的表现, 是与人类的理智格格不入的。人类的明智的追求应当是与其他物种的共存以及不同国家、不同民族之间的共生。

2. 布鲁塞尔器

布鲁塞尔器亦称三分子模型。它最初是作为一种含有自催化或交叉催化步骤的化学反应模型提出来的, 但它在解释含有合作现象的诸多现象时也是十分重要的。三分子模型反应序列为



其中, A, B 为反应物; D, E 为生成物; X, Y 为中间产物。这个模型可示为图 7—17。反应物 A 与 B 在反应中不断消耗, 但由于及时得

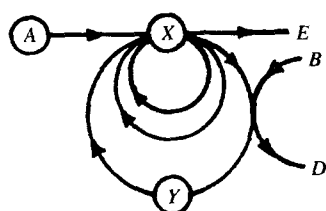
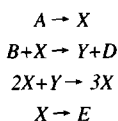


图 7—17 布鲁塞尔器



或

到补充,其浓度在反应中保持不变。生成物 D 与 E 则一经生成,即刻被取走。但是, X 与 Y 的浓度在反应过程中发生有趣的变化。

在第一个反应中, X 增多,在第二个反应中 X 减少,在第三个反应中 X 增多,而在第四个反应中 X 减少。Y 的浓度在第二个反应中增加,而在第三个反应中减少。X 与 Y 之间存在着交叉催化的关系。而关键的一个反应就是第三个反应, X 既是反应物,又是生成物,即是说,这是个自催化反应。不仅如此,在这个反应中三个分子同时参加一个反应。这样,整个反应的动力学方程是双变量的微分方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k_1 A - k_2 Bx + k_3 x^2 y - k_4 x \\ \frac{dy}{dt} &= k_2 Bx - k_3 x^2 y \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

这里, A, B, x, y 分别为组分 A, B, X, Y 的浓度。适当选择组分和时间单位,可将方程(7.12)简化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= A - Bx + x^2 y - x \\ \frac{dy}{dt} &= Bx - x^2 y \end{aligned} \right\} \quad (7.13)$$

这个方程的定态解为 $x_0 = A, y_0 = B/A$ 。当 A 不变而 B 增大到一临界值时,该定态失稳。之后,该反应系统进入一个 x 与 y 随时间周期变化的状态,与之对应的相迹为极限环,如图 7—18 所示。当 $B > 1 + A^2$ 时,从不同的初始条件出发的相轨道(1)、(2)、(3)、(4)、(5)都趋向同一个环,在极限环的不同位置上, x 与 y 有不同的值。随着时

间的推移, x 与 y 的值不断变化, 但是其变化是周期性的, 即从某一点进入极限环的系统过了一定时间后重新回到该点, 然后是周而复始地重复着同样的变化过程。

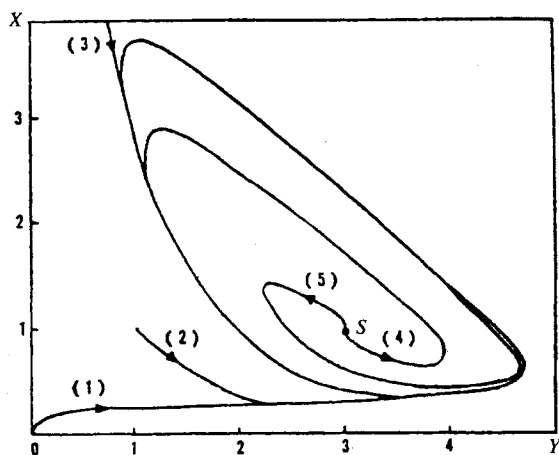


图 7—18 组分 X 的浓度与组分 Y 的浓度的关系

焦点 S 是定态, 当 $B > 1 + A^2$ 时失稳, 并且可观察到所有的轨道
(图中画出五条) 无论其起始状态如何, 都导向一个极限环。

x 与 y 的振荡周期既与确定反应速率的动力常数有关, 亦与系统的边界条件(如 A 、 B 的浓度、温度等)有关。但是, 这些外参量并不含有使 x 与 y 发生周期变化的振荡因素。因此, x 与 y 的周期振荡是在一定外界条件下以自创生、自组织的方式出现的新的时间结构。

三、系统进化方程的一般形式

我们在上面看到的罗特卡-沃尔特拉方程和布鲁塞尔器的动力学方程以及描述各种具体系统进化的方程都可以看作是系统进化方程一般形式的特殊类型。由于系统进化论试图揭示适用于物理学、化学、生物学、心理学、社会学、经济学和生态学以及其他各种学科领域的统一的进化原理, 我们必须有系统进化方程的一般形式。但是,

一方面由于系统数学描述的局限性,对于大量系统来讲还无法建立其进化方程;另一方面,由于非线性方程的求解还面临着严重困难,大量系统的进化方程尚难进行深入讨论。电子计算机的广泛使用正在帮助人们克服部分困难,但是总的说来,目前所能处理的系统进化方程多数还是比较简单的类型。

因此,虽然人们把非线性随机偏微分方程看作是系统进化方程的一般形式,但是其“普适性”还是有限的。人们将希望寄托在数学的发展。这里,将仅就系统进化方程的直观解进行粗糙的定性讨论。先看非线性随机偏微分方程

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{N}(\alpha, \mathbf{q}, \nabla, \mathbf{x}, t) + \mathbf{F}(t) \quad (7.14)$$

的特点。显然,这个方程既包含有确定性的驱动力 $\mathbf{N}$,也包含有随机性的涨落力 $\mathbf{F}(t)$ 。方程中各符号的含义如下:

$\mathbf{q}$ 表示状态向量,它的各分量 $q_i, i = 1, 2, \dots, n$ 为状态变量。一般, $\mathbf{q}$ 是空间与时间的函数,即

$$\mathbf{q}(\mathbf{x}, t) = [q_1(\mathbf{x}, t), q_2(\mathbf{x}, t), \dots, q_n(\mathbf{x}, t)]$$

$\mathbf{x}$ 表示空间向量,一般取

$$\mathbf{x} = (x, y, z)$$

α 表示控制参量,有

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$$

∇ 表示微分算子

$$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$$

t 表示时间。

实际上,方程式(7.14)是表示系统在驱动力 $\mathbf{N}$ 和涨落力 $\mathbf{F}$ 作用下进化的状态方程,一般取一阶微分方程组形式。

由式(7.14)给出的系统进化方程有下列一般特征^①。

① Haken H. *Advanced Synergetics*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 18—22

1. 多分量

作为一般情形,我们所研究的是由大量要素(或子系统)组成的系统。描述这样的系统,需要用多个状态变量。因此,进化方程中的状态向量一般由多个分量组成。

2. 非线性

实际系统一般都含有各种非线性因素,因此系统进化方程是非线性的,而线性方程被视为其特殊情形或近似处理。例如,考虑浓度为 q_1 的化学物质,它通过与浓度为 q_2 的化学物质的相互作用,以自催化方式产生出来。 q_1 的增长率为

$$\dot{q}_1 = \beta q_1 q_2 \quad (7.15)$$

显然,两个成份之间的合作是由非线性项表示的。一般,方程式(7.14)的右边是系统诸变量的一个非线性函数。例如,方程式(7.9)、(7.10)和(7.13)都含有非线性项。非线性项在系统进化方程中的重要性,我们将在第6节详细讨论。

3. 随机性

系统进化方程的又一重要特征是它含有随机性。由于随机性,系统的时间进化是无法绝对准确地预测的。需要考虑三种随机性。

(1) 外在随机性。经典统计理论认为,遵从牛顿力学定律的那些粒子具有确定性,但由大量粒子组成的系统具有随机性。因此,当我们从微观的系统描述转到使用中观或宏观变量的系统描述时,例如当我们不是用各个分子的位置而是用这些分子的局部密度和局部速度来描述液体的时候,就必须考虑随机性,考虑涨落。在方程式(7.14)中, $F(t)$ 就表示这种外加的随机因素。

(2) 量子随机性。海森堡的测不准原理指出,不可能同时绝对精确地测定一个微观粒子的位置和速度。而玻恩(Max Born, 1882—1970)对波函数的统计解释表明,微观粒子的波是几率波。这样,在微观世界,由

量子涨落表示的随机性是不可避免的。因此,对于微观事件的准确预测从原理上就成为不可能,并且为达到宏观尺度而放大微观事件时必须考虑量子涨落。显然,对于任何物质系统来说,量子随机性是不可避免的。但是,量子随机性对系统的宏观模式究竟有多大作用,或者在多大程度上影响系统进化过程,只能根据实际情况作出判断。在有的情况下可能有直接的重大作用,而在有的情况下可能毫无作用。

(3) 内在随机性。如果忽略外在随机性,也不考虑量子随机性的可能影响,那么方程式(7.14)就成为完全确定性的。但就是在这种情况下,系统的未来发展还是有可能沿着完全不同的路径进行。其原因在于系统对初始条件的敏感性。例如,当一个钢球落到垂直放置的刀刃上时,钢球在碰到刀刃前的相对位置稍有区别,就会导致钢球未来运动轨道截然不同,或者落到刀刃的左边,或者落到其右边。最近 30—40 年间关于混沌现象的研究表明,内在随机性在系统进化中起着特别重要的作用。

4. 控制参量

系统进化的一个必要条件是它的开放性。系统与环境有物质交换、能量交换和信息交换。这些交换使得系统从一种结构转变为另一种结构。为了表示外界对系统的作用,我们引入控制参量。方程式(7.14)中的 α 表示控制参量。控制参量从系统外界控制着系统状态的变化。当控制参量变化到某个临界点时,系统结构的稳定性就遭到破坏,发生分叉,系统可能进入几个分支中的某一支。

四、系统进化方程的解

有了系统进化方程,就可以用该方程的解来讨论系统的进化。但是由于该方程是非线性随机偏微分方程,除了施加各种约束条件的特殊情形外,一般来讲,系统进化方程是不可解的。不过,在相空间中相点的轨道就意味着系统进化的路线,原则上我们可以用图解法来表示系统进化方程的解 $q(t)$ 或 $q(x, t)$ 。下面,主要利用各种图

来从直观上定性地讨论系统进化方程的解^①。

先讨论 q_j , 即 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 。它们与空间坐标 x 无关, 只与时间 t 有关。 $q_1(t), q_2(t)$ 等的时间进化示如图 7—19。这些图表示各变量的时间进化。

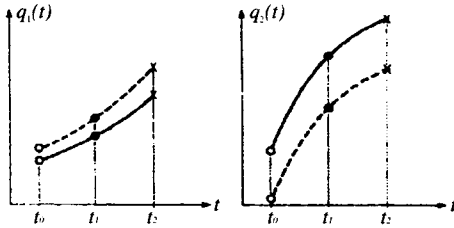


图 7—19 各变量的时间进化

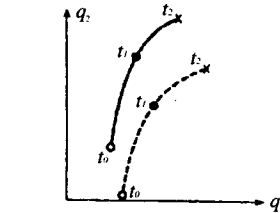


图 7—20 系统状态的时间进化

为表示系统的时间进化, 取 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 为 n 维空间的坐标, 再标上各时刻 $t_1, t_2, \dots, t_n$, 则点 $(q_1(t), q_2(t), \dots)$ 表示系统在进化过程中通过的各点, 如图 7—20 所示。如在 $t \rightarrow +\infty$ 和 $t \rightarrow -\infty$ 中连续取点, 就得到进化轨迹, 如图 7—21 所示。

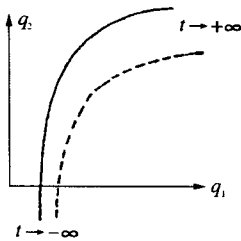


图 7—21 系统进化轨迹

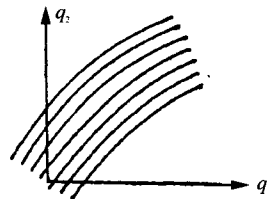


图 7—22 轨迹集

如果画出一条轨迹附近的其他轨迹, 就可得到轨迹集, 见图 7—22。因为这些轨迹很像流体的流线, 我们就称之为“流线”, 并且称流

^① Haken H. *Advanced Synergetics*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 23—32。想要了解其数学细节的读者可参看此书有关章节。

线的总体为“流”。

此外,在图 7—19 至图 7—22 的几张图中,还可以看到:变量的初值不同,所画出的轨道就不同,实线与虚线分别表示不同初值下各变量的时间进化。

这些轨道并非总是(在一维上)从 $q = -\infty$ 到 $q = +\infty$ 。它们可能以某种方式终止。因为这些流线被“终点”吸引,把这些“终点”称为吸引子。实际上,所谓吸引子是指在把相空间某一区域的点都取作初值时,其轨道在 $t \rightarrow \infty$ 下的极限集合。方程式(7.14)所示的耗散系统的运动最终要趋向维数比原始相空间低的吸引子。

现已知道,有各种各样的吸引子。

1. 不动点

如果 $t \rightarrow \infty$ 时系统趋向一个与时间无关的定态,即相空间中一个特定的点,就称之为不动点。不动点是零维的吸引子。一维以上的系统原则上就可能(但不必定)具有不动点。例如,在二维空间中常见的不动点有结点、焦点、鞍点等。

结点是相平面内流线直接收敛于它的点(稳定结点),或者从它发散的点(不稳定结点)。图 7—23 表示稳定结点,图中流线结尾于此点;如果时间反演,流线将背离此点。图 7—24 表示,当流线趋于稳定结点时,各变量的时间变化是单阻尼的。

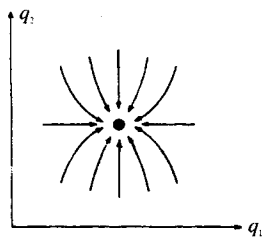


图 7—23 结点

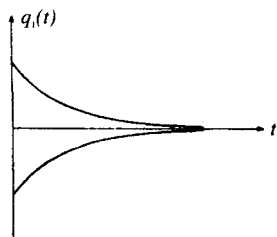


图 7—24 趋于结点的变量 $q_i(t)$

焦点是相平面内按螺旋流线收敛于它的点(稳定焦点),或从它发散的点(不稳定焦点)。图 7—25 表示稳定焦点。图中流线结尾于此点;如果时间反演,相点将沿着相同的流线背离此点。图 7—26 表示趋于稳定焦点的各变量的时间变化是振荡且阻尼的。

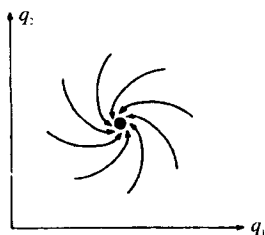
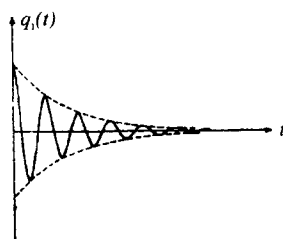
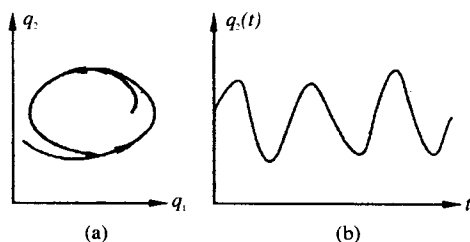
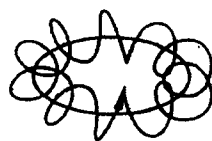


图 7—25 焦点

图 7—26 趋于焦点的变量 $q_1(t)$

2. 极限环

极限环是 $t \rightarrow \infty$ 时相空间某一区域内的流线都收敛于它的孤立的闭合轨道(稳定极限环),或者从它发散的孤立的闭合轨道(不稳定极限环)。可分为三种:其一是稳定极限环,其附近一切流线都收敛于它;其二是单测稳定极限环,只有其内侧或外侧流线收敛于它;其三是不稳定极限环,极限环上每一条流线都向远离极限环的方向发散。在不同维数的相空间中可形成不同维数的极限环。例如,图 7—27(a)所

图 7—27 极限环与沿极限环运动的变量 $q_2(t)$ 图 7—28 三维空间的
极限环

示的是相平面上的稳定极限环,是一维的,诸轨迹从极限环的内部和外部接近极限环。图 7—27(b)表示沿该极限环运动的各变量的时间变化是无阻尼振荡。与之不同,图 7—28 表示三维相空间中的二维极限环。

需要强调的是,极限环不一定是圆或椭圆,它可以是各种不同形式的闭合轨道,但必须是处处可微的,即是说极限环处处有切线。

相平面上的极限环是一维流形。图 7—29(a)所示的极限环流形中,流形上的每个点可以映象为一个区间上的一点;反之亦然。在图 7—29(b)中,流形上的交迭部分可映象为线上的交迭部分,反之亦然。流形上的每个区间对应于线上的一个确定区间。

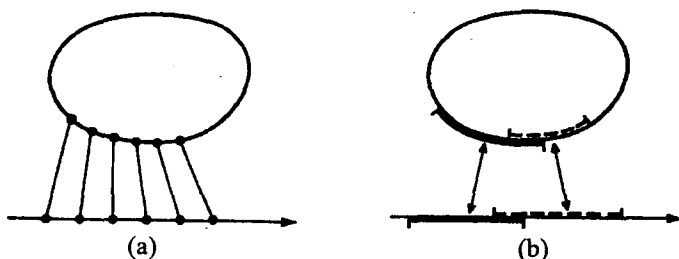


图 7—29 流形及其映象

3. 环面

环面也是一种流形。图 7—30 表示三维空间上的二维环面。环面的维数至少为二,而形成环面的相空间维数至少为三。当我们以适当方式把环面上的各部分映象到一个平面上时,可得到图 7—31 所示的正方形。环面上的每个面元与平面上的一个元一一对应,同时平面元上的每个点与环面元上的每个点也一一对应,反之亦然。显然,我们可用坐标系 $\varphi_1 - \varphi_2$ 描述环面上的每个点。由于在每个点 (φ_1, φ_2) 都存在一个切平面,环面也是一种可微流形。

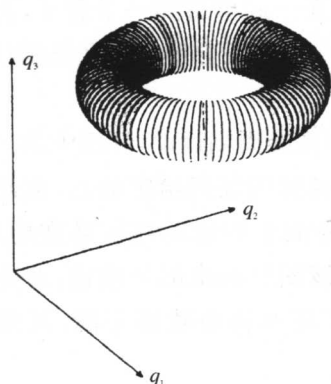
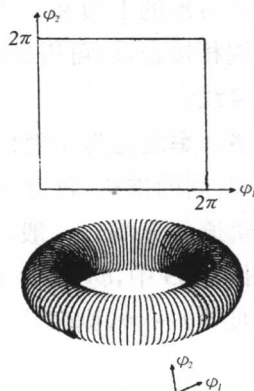


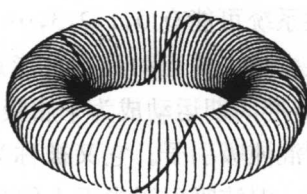
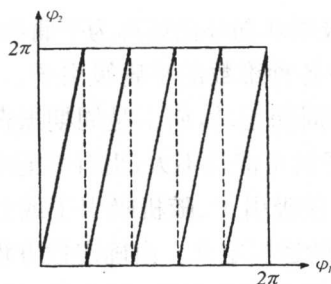
图 7—30 三维空间中的二维环面


 图 7—31 二维环面局部座标 φ_1 和 φ_2 一对一地映象到一个正方形

环面上的运动是不是周期的,即矢函数

$$\mathbf{q}(\underbrace{\omega_1 t}_{\varphi_1}, \underbrace{\omega_2 t}_{\varphi_2})$$

是否填满整个环面,取决于各运动方向的诸频率 ω 之比。如果诸频率之比为有理数,就有周期运动,绕线闭合,环面上只有一些线缠绕。例如在图 7—32 中, $\omega_2 : \omega_1 = 5 : 1$, 从环面上任意一点出发都只有一条闭合轨道,它在平面上的映象为左图中几条倾斜的实线。实际上,如


 图 7—32 $\omega_2 : \omega_1 = 5 : 1$ 的情况

果把左图正方形的上边和下边折迭在一起可得到一个管子,再把它弯曲使管端相接合,就可得到环面。这时,正方形上的几条斜线连成环面上的绕线。

如果诸频率之比为无理数,就出现准周期运动,环面上的绕线不闭合,随着时间的推移,轨道可以任意接近任何给定的点,因此整个环面将被轨道所充满。一般,高维环面上的运动往往是准周期的。例如,在图 7—33 中, $\omega_2:\omega_1 = \pi:1$ 。该图只画出部分轨道,对应于有限时间。如果 $t \rightarrow \infty$,则整个平面和环面将由轨道充满,从而变成全黑。

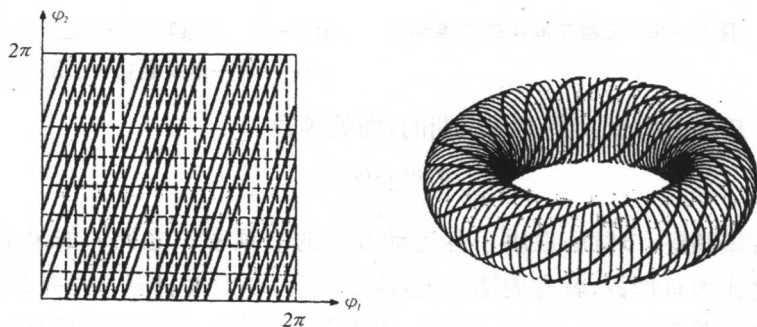


图 7—33 $\omega_2:\omega_1 = \pi:1$ 的情况

4. 混沌吸引子

上述的三种吸引子即不动点、极限环和环面统称为平庸吸引子。非线性系统可能有 $0, 1, 2, 3, \dots$ 等各种维数的平庸吸引子。但是,高维吸引子上的运动最有可能是准周期运动,而不是周期振荡。现已知道,准周期运动成为平庸吸引子的可能性不大,更有可能出现的是所谓混沌吸引子。它又被称为奇怪吸引子、随机吸引子或分形吸引子等。混沌吸引子尚无人们公认的适当定义。由确定性方程描述的系统中出现的无规则运动形成所谓确定性混沌,与之对应的是混沌吸引子。大致上可以说,平庸吸引子的不稳定流形的闭合可视为

混沌吸引子。我们来看几种混沌吸引子。

最早发现的是洛伦兹吸引子。洛伦兹(Edward Norton Lorenz, 1917—)的气象模型是

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= \sigma(y - x) \\ \dot{y} &= x(r - z) - y \\ \dot{z} &= xy - bz \end{aligned} \right\} \quad (7.15)$$

其中 σ, r, b 是外参量。这个模型似乎很简单,但它是一个非线性系统。它的相轨道显示出一种非常复杂的图形,如图 7—34 所示。所有的相点永远处在一定限界之内,不会跑到画面之外,但又不自我重复。该吸引子像一只蝴蝶的双翼,由两片构成,每片各自围绕着原来的一个不动点。相轨道在一片中由外向内绕到中心附近后,随机地跳到另一片外缘继续向内绕,再突然跳回原来那片的外缘。

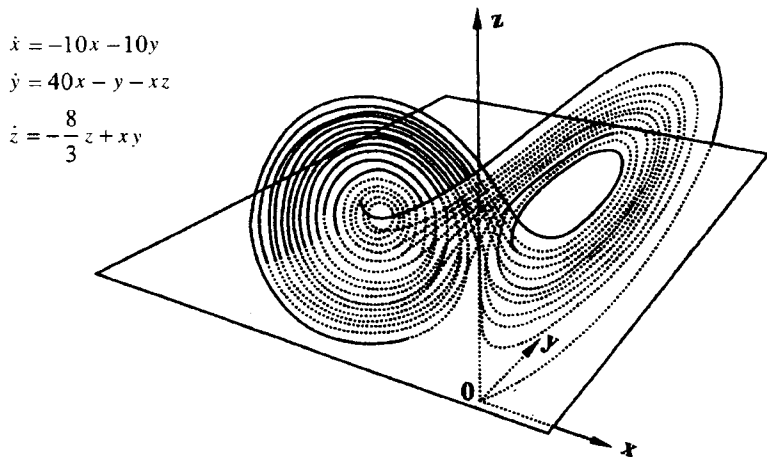


图 7—34 洛伦兹吸引子

郝柏林. 分岔、混沌、奇怪吸引子、湍流及其它. 物理学进展, 1983. 3(3): 384

更简单的一种混沌吸引子是下式所示的偌斯勒 (Otto E. Rössler, 1940—) 吸引子, 它的微分方程组只有一个非线性项。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= -y - z \\ \dot{y} &= x + ay \\ \dot{z} &= b + z(x - c) \end{aligned} \right\} \quad (7.16)$$

其中 a, b, c 是外参量。相应的图形为图 7—35。不难理解, 轨道沿着相空间中一个二维曲面被排斥, 而在一个一维曲线的方向上却被吸引。

稍微复杂的混沌吸引子是图 7—36 所示的混沌吸引子。它是在贝洛索夫—扎鲍廷斯基反应中充分搅拌反应器中的物质而得到的。该图表示 Br^- 在不同时刻浓度的对数的变化, 此图取 $\tau = 53$ 秒。

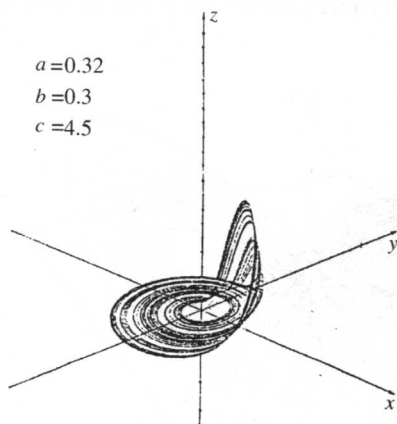


图 7—35 偌斯勒吸引子

呈涡旋状, 轨道从不稳定定点的同侧射入。尼科里斯 G 等. 探索复杂性. 成都: 四川教育出版社, 1986. 138

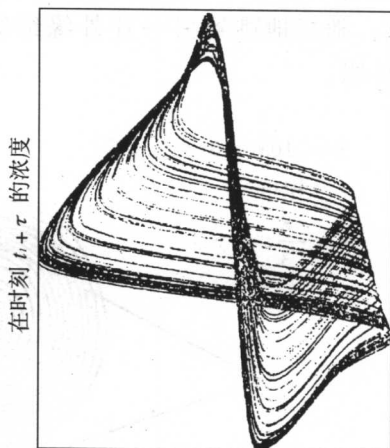


图 7—36 B—Z 反应的混沌吸引子

以 Br^- 离子浓度为测量对象。尼科里斯 G 等. 探索复杂性. 成都: 四川教育出版社, 1986. 142

在其他许多例子中,我们可以观察到各种混沌吸引子的奇妙图形。它们足以使人们设想混沌吸引子有一些特征。现根据上面所具例子,在与平庸吸引子的比较中将混沌吸引子的“奇怪”之处概括如下:

(1) 混沌吸引子具有内在随机性。洛伦兹吸引子、倍斯勒吸引子、贝洛索夫-扎鲍廷斯基反应中出现的混沌吸引子都是确定性模型中出现的混沌吸引子。按照传统的观点,确定性模型对于特定的初始条件,应有确定的结果。但是混沌吸引子的发现完全打破了这一传统观点。在一定条件下,确定性模型也会导致不确定的随机的结果。确定性模型中出现的无规则运动来自内在随机性。因此,混沌乃是系统的确定性和内在随机性交互作用的结果。

(2) 混沌吸引子是一种整体稳定、局部不稳定的运动状态。它有内外两种运动方向:吸引子外部的一切运动轨道都被它吸引,向它靠拢,这是稳定方向;而吸引子内部的一切运动轨道都互相排斥,这是不稳定方向。混沌吸引子的出现看来可以用“吸引”和“排斥”这一对古老的两极对立的统一来说明。一方面,耗散运动的轨道最终要被吸引到(即收敛到)相空间的有限区域即吸引子上;另一方面,运动轨道从局部看来又是不稳定的,要沿某些方向指数分离。向量 $q(t)$ 一旦进入这样的有限区域,它就“永远”留在那里,但它的轨道并不落在一个流形上。结果,向量 $q(t)$ 就像一根在有限线团中穿来穿去的针那样运动。可以说混沌中既有“和而不同”,又有“同而不和”;混沌是“和而不同”与“同而不和”的统一。

(3) 混沌吸引子上的运动对于初始条件十分敏感,进入混沌吸引子的部位稍有差异,运动轨道就截然不同。当人们在 20 世纪 60 年代前后沉溺于对天气预报的乐观主义的时候,洛伦兹指出长期天气预报注定要失败。他在 1979 年美国科学促进会上的一次讲演中用形象的比喻问道:“一只蝴蝶在巴西煽动翅膀会在得克萨斯引起龙

卷风吗?”这样,科学家们把混沌吸引子对初始条件的敏感性说成是“蝴蝶效应”。洛伦兹用图 7—37 说明了从几乎相同的出发点开始的天气模式在不久的将来会变成完全不同的天气模式。问题在于在混沌中初始差异被放大成巨大差异。实际上,这并不是新发现,人们早在日常生活中体验过这种变化。一首外国民谣早就生动地描绘过这种变化过程:“钉子缺,蹄铁卸;蹄铁卸,战马蹶;战马蹶,骑士绝;骑士绝,战事折;战事折,国家灭。”^①中国的哲人也曾以“差若毫厘,缪以千里”或“差之毫厘,失之千里”的精辟论断阐明了“对初始条件的敏感性”。

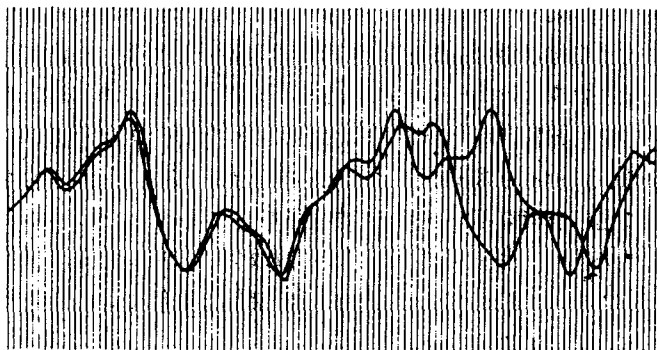


图 7—37 两组天气模式的分道扬镳

洛伦兹看到,从几乎相同的出发点产生出两个截然不同的天气模式。

格莱克 J. 混沌. 上海:上海译文出版社,1990. 18

(4) 混沌吸引子作为相空间中的子集,其维数为分维,通常是分数维。维数是空间和几何对象的重要参量。通常认为,维数总是整数。例如,空间是三维,平面是二维,线段是一维,点是零维。就一个规整的几何对象而言,如果把线度放大为 l 倍,整个对象就放大为原

^① 据说,这是维纳引用过的民谣。见:格莱克 J. 混沌. 上海:上海译文出版社,1990. 25

来的 $k = l^D$ 倍, D 是空间维数。例如,

若 $D = 1, l = 2$, 则 $k = 2^1 = 2$

若 $D = 2, l = 2$, 则 $k = 2^2 = 4$

若 $D = 3, l = 2$, 则 $k = 2^3 = 8$

取关系式 $k = l^D$ 的对数, 就得到新的维数定义, 即

$$D = \ln k / \ln l \quad (7.17)$$

这里维数 D 不必为整数。这就是豪斯道夫(Felix Hausdorff, 1868—1942)于 1919 年引入的不限于整

数的维数概念。后来, 曼德勃罗在分形理论中进一步发展了维数概念。在混沌研究中已经发现, 混沌吸引子的维数通常是大于零的非整数维。例如看康托尔(Georg

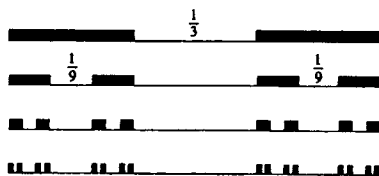


图 7—38 康托尔集合

Ferdinand Ludwig Philipp Cantor, 1845—1918)三分集。取 $[0, 1]$ 线段三等分后舍去中段, 对剩下的两段进行同样的操作, 如此无穷继续下去, 最后剩下的点的总体就是康托尔三分集, 如图 7—38 所示。可算出其维数为

$$D = \ln 2 / \ln 3 = 0.6309 \quad (7.18)$$

这表明康托尔三分集的维数大于 0 而小于 1。在大量混沌吸引子中已经发现, 其维数取非整数, 如表 7—1 所示。

混沌吸引子的分数维特性告诉我们, 混沌吸引子的维数介于点与线、线与面或面与体之间。混沌吸引子不是一个点、线或面, 即不是一种拓扑流形, 而是一种分形。

(5) 混沌吸引子具有无穷嵌套的自相似结构。混沌吸引子的轨道为了在有限的几何对象上实现分离, 就要无穷次地折叠起来。结果, 一方面, 导致非整数的维数。从以上所示各种混沌吸引子的图像中可知, 在某个方向上有连续的一维结构, 而在其垂直方向上虽有一

表 7—1 混沌吸引子的维数

模 型	方 程	参数值	维数
埃农映象	$x_{n+1} = 1 - \mu x_n^2 + y_n$ $y_{n+1} = b x_n$	$\mu = 1.2, b = 0.3$	1.20
		$\mu = 1.4, b = 0.3$	1.26
洛伦兹模型	式(7.15)	$a = 16, r = 40, b = 4$	2.06
倍斯勒模型	式(7.16)	$a = b = 0.2, c = 5.7$	2.014
强迫布鲁塞尔器	为式(7.13)第一式右边加 $a \cos(\omega t)$ 而得	$A = 0.4, B = 1.2$ $\alpha = 0.08, \omega = 0.852$	2.15

参看：郝柏林. 分岔、混沌、奇怪吸引子、湍流及其它. 物理学进展, 1983, 3(3); 391

定宽度,但又处处稀疏,不构成一维连续统,结果是非整数的维数。另一方面,无穷折叠导致无穷嵌套的自相似结构。图 7—39 所示的是埃农(Michel Hénon, 1931—)吸引子。其中, (a) 表示在一定初值下一万次迭代的结果。把迭代次数增加到 10 万次, 取出(a)图小方框中的部分示于(b), 可知它具有内部结构。再增加迭代次数, 并取出(b)图小方框中的部分示于(c), 就可知道(b)与(c)无所区别。相同的操作可重复多次。这种结构特性如像大人套小人的俄国玩偶, 又像大箱套小箱的中国套箱。混沌吸引子的这一特性表明, 混沌不是简单的无序或混乱, 而是虽无明显的周期和对称, 但具有丰富内部层次的“有序状态”。

(6) 混沌吸引子的“结构”不随参量连续变化, 即使在导致混沌吸引子的微分方程连续地依赖于参量的情况下也是如此。在参数连续变化的过程中, 混沌吸引子的整体结构会发生突变。只要仔细考察各种混沌吸引子的变化过程就能理解这一点。例如在图 7—40 中, 系统在参量 μ 连续增大到一定程度时, 其混沌结构发生突变。

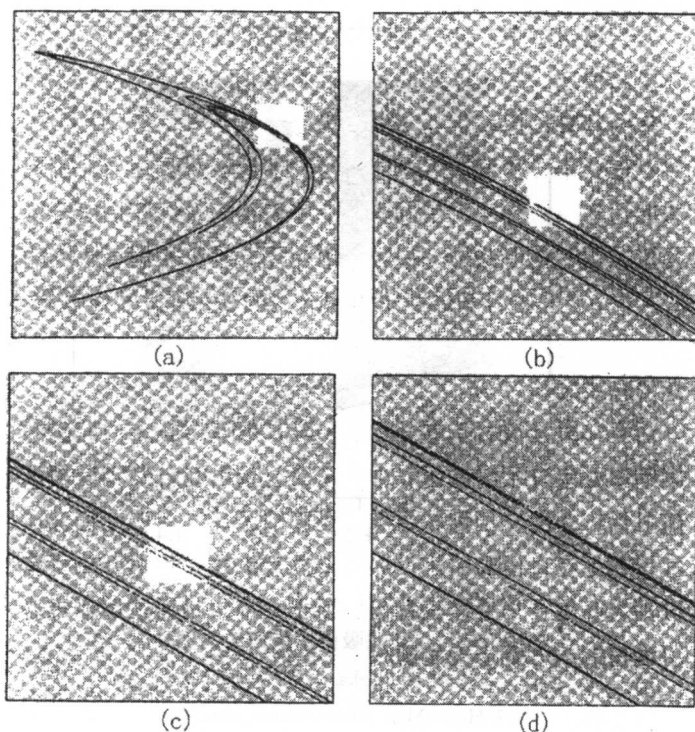


图 7—39 埃农吸引子

格莱克 J. 混沌. 上海: 上海译文出版社, 1990. 163

从以上的讨论中,我们看到了方程(7.14)可能会产生丰富多彩的结果。系统进化的趋向是各种各样的吸引子,可分为不动点、极限环、环面以及混沌吸引子。不同系统趋于不同吸引子,同一个系统在不同情况下也趋于不同吸引子,而不同吸引子也可以相互转化。总的来说,极限环比不动点复杂,环面比极限环复杂,而混沌吸引子比平庸吸引子复杂。如果要把这些吸引子都显示在一个相空间上,则需要把整个相空间划分为多个“流域”。每个流域中的各点在 $t \rightarrow \infty$ 时都趋向一个特定吸引子,系统的长时间行为依赖于初始点所在的

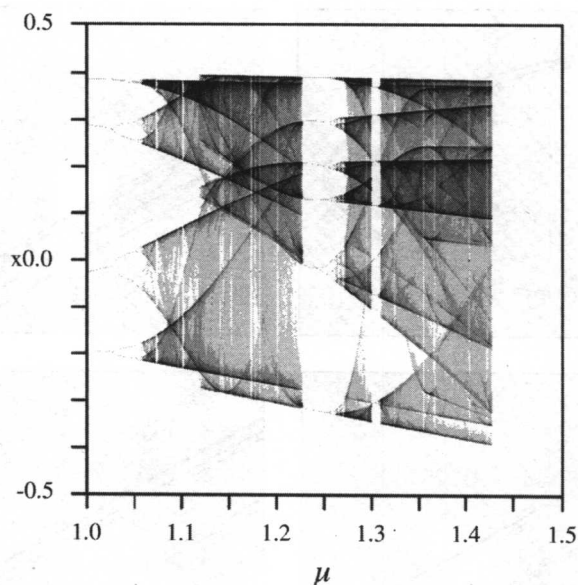


图 7—40 混沌吸引子结构的突变

见: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e7/HenonMap_BifurcationDiagram.png

流域,但同一流域中的各点都会达到同一个吸引子。吸引子上的运动对应于“定态”,吸引子外的运动乃是暂态过程。这里我们主要讨论了各种吸引子,但是暂态过程的研究将会产生更丰富多彩的结果。

7.4 分叉与相变

7.4.1 系统进化中的质变

如已所述,系统的无序—有序、有序—有序、有序—混沌转变是质变过程。我们在第五章已看到一个系统的质取决于要素的质、数量、运动量与排列次序。根据这一理论,可以找出系统质变的一般描

述方法。但是,我们无法根据要素在系统质变中的作用而建立这种一般方法,因为这种作用只能显示不同类型质变的个性,而不是共性。我们也无法根据要素的数量和运动量在系统质变中的作用而建立这种一般方法,因为它们不是规定系统质的独立因素。这样,我们只能寄希望于第四个因素即各要素的排列次序。实际上,科学家们已在这方面作了大量工作。

设想一个在势场中运动的小球,一开始势函数曲线如图 7—41(a)所示,球将停留在 $q=0$ 。适当改变控制参量,势函数曲线可变为

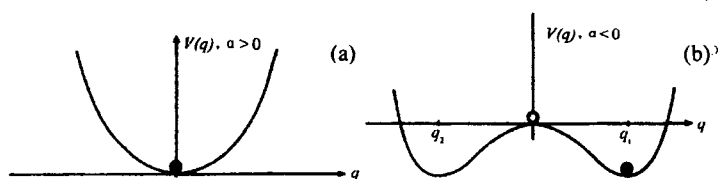


图 7—41 小球在势平面上的位置

如图 7—41(b)所示,球将停留在 $q=q_1$ 或 $q=q_2$ 。这个小球的流图很简单。如果势曲线只有一个极小值,就得图 7—42(a);如果有两个极小值,就得图 7—42(b)。从图 7—41(b),还能看出涨落的重要性。如果小球原先位于 $q=0$,那么它将掉进哪一侧的凹处完全取决于涨落。

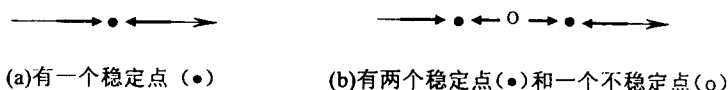


图 7—42 小球的一维运动

在图 7—41 中,小球的运动方程是:

$$\dot{q} = -\alpha q - |k|q^3 \quad (7.19)$$

取平衡点

$$\dot{q} = 0$$

那么(a)与(b)两种情况分别为:

(a) 当 $\alpha > 0$ 时, 唯一解为

$$q = 0, \text{ 稳定解。}$$

(b) 当 $\alpha < 0$ 时, 有三个解, 即

$$q = 0, \text{ 不稳定;}$$

$$q = \pm \sqrt{|\alpha|/|k|}, \text{ 稳定。}$$

显然, 当 α 从正值逐渐变为负值的过程中, 在 $\alpha = 0$ 时, 稳定平衡位置 $q = 0$ 变为不稳定的, 而 α 变为负值后出现两个稳定平衡位置。

但是在许多实际问题中系统并不存在势函数。因此需要采用所谓线性稳定性分析。引入一个小的含时偏差 u , 使得方程(7.19)的解 q 为

$$q = q_0 + u = u \quad (7.20)$$

将此式代入方程(7.19), 只保留线性项, 则对于 $\alpha < 0$, 有

$$\dot{u} = |\alpha|u, \quad (7.21)$$

其解为

$$u(t) = u(0)e^{|\alpha|t} \quad (7.22)$$

因 $|\alpha| > 0$, $u(t)$ 便以指数增长。这表明 $q_0 = 0$ 的状态是不稳定的。

在线性稳定性分析后, 就要判定系统将进入哪一种新状态。考虑下列两个微分方程:

$$\dot{q}_1 = \lambda_1 q_1 - q_1 q_2 \quad (7.23)$$

$$\dot{q}_2 = -\lambda_2 q_2 + q_1^2 \quad (7.24)$$

这组方程适用于许多领域。例如在化学上, 方程(7.23)表示浓度为 q_1 的化学物质按 $\lambda_1 q_1$ 自催化地生成, 而由于与浓度为 q_2 的另一物质的相互作用, 按 $-q_1 q_2$ 分解。方程(7.24)右边的第一项表示浓度为 q_2 的chemical物质的自发分解, 第二项表示由于 q_1 的双分子过程而

发生的 q_2 的生成。

在此我们主要讨论这些方程的数学特性。设 λ_1 很小且为正。这时,只要 q_1 和 q_2 是小量,在一级近似下就可忽略二次项,因此由方程(7.23)可知 q_1 变化很慢。由方程(7.24)可知, q_2 是由 q_1^2 驱动的。但由于 q_1 变化很慢,便可认为 q_2 变化也很慢。如果 λ_2 为正且远大于 λ_1 ,那么同 $\lambda_2 q_2$ 相比就可忽略 $\dot{q}_2$ 。令

$$\dot{q}_2 \approx 0 \quad (7.25)$$

可从方程(7.24)得

$$q_2 \approx q_1^2 / \lambda_2 \quad (7.26)$$

这个方法通常被称为绝热近似。据此我们可用 q_1 具体表示 q_2 ,或者说 q_2 被 q_1 役使。这种役使作用出现在大量物理系统和非物理系统中。当这些系统接近不稳定点时,系统的动力学和突现结构通常由少数几个集体变量即所谓序参量决定,而系统其他变量的行为则由这些序参量(和随机力)规定。按照这种役使原理,当我们处理被 q_1 役使的大量变量时,就能大大减少系统自由度,简化复杂问题。这样,在求解方程(7.14)时,不求解 q 的 n 个方程,只求解 q 的若干个方程(如 $i \ll n$ 个)即可,而其余的 q 都由 q_i 表示出来。这时, q_i 称为序参量。当然,方程数目可能非常多,它们可能有含时系数,还含有涨落力。但是,更细致的研究表明,在大量情况下,用 $q_1(t)$ 来表示同一时刻 t 的 $q_2(t)$ 是确实可能的,并且对于一大类非线性随机偏微分方程(即进化方程(7.14))可以设计显式方法来找出函数 $q_2(t) = f(q_1(t))$ 。线性稳定性的丧失、序参量的出现以及役使原理的有效性这三者之间存在着重要的内在联系。当控制参量变化时,一个系统会失去线性稳定性,如同由方程(7.23)与(7.24)中所知。在这种情况下本征值的实部 $Re\{\lambda_1\}$ 变得很小且改变了符号。这时,役使原理发挥作用。于是我们就可以认为在结构发生变化的那些关节点上,序参量支配着系统的行为。正是这种内在联系使得我们能为在

完全不同的系统中发生的宏观变化建立广泛的类比,揭示系统进化的一般规律,尤其是系统质变的一般原理。

研究系统的质变,主要有两种理论,其一是分叉理论,其二是相变理论。分叉理论属于非线性数学的范畴,在此我们不对此理论作详细介绍,只是简要地考察系统进化中几种典型的分叉现象。并且我们也不介绍相变理论的细节,只是简要地讨论平衡相变和非平衡相变的一般特征。

7.4.2 分叉

一、分叉的发生

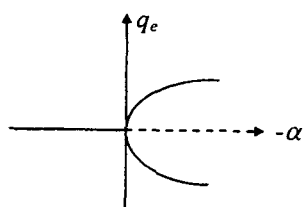
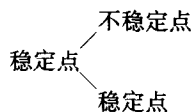


图 7—43 作为 α 函数的
平衡座标

我们继续以方程(7.19)来讨论分叉。在图 7—41 中,我们在势曲线上表示了小球的平衡位置。如果我们把平衡位置 q_e 表示为 α 的函数,便得到图 7—43。图中,对于 $\alpha > 0$, $q_e = 0$ 是稳定的。但对于 $\alpha < 0$, $q_e = 0$ 变成不稳定的(以虚线表示),而出现了两个平衡位置(以实线表示)。这样,我们有下列图式:



因为这个图式具有叉的形状,整个现象就称为分叉(bifurcation),又称分歧、分岔、分支等。

为了更广泛地讨论分叉现象,我们考虑系统进化方程(7.14)。如果忽略噪声影响,就得

$$\dot{q} = N(q, \alpha, \nabla, x, t) \quad (7.27)$$

假定 N 不显含时间,即讨论自治系统。又忽略任何空间依赖关

系,则方程(7.27)变为

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{N}(\mathbf{q}(t), \alpha) \quad (7.28)$$

设对于控制参量 α 的某一定值(或值的某一区间),方程(7.28)有一稳定解 $\mathbf{q}_0(t, \alpha)$ 。为讨论 α 变化时该解的稳定性,设

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_0 + \boldsymbol{\omega}(t), \quad (7.29)$$

其中 $\boldsymbol{\omega}(t)$ 是一小量。将式(7.29)代入式(7.28),只保留 $\boldsymbol{\omega}(t)$ 的线性项,则

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{L}\boldsymbol{\omega} \quad (7.30)$$

其中 $\mathbf{L}$ 是 $\mathbf{q}_0$ 的函数,且 $\mathbf{L}$ 与 $\mathbf{N}$ 有关。已知 $\mathbf{L}$ 与 $\mathbf{q}_0$ 的时间关系相同。

设 $\mathbf{q}_0$ 与时间无关。为求解方程(7.30),设

$$\boldsymbol{\omega}(t) = e^{\lambda t} \mathbf{v} \quad (7.31)$$

式中 $\mathbf{v}$ 为常向量。将式(7.31)代入方程(7.30),得

$$\mathbf{L}\mathbf{v} = \lambda \mathbf{v} \quad (7.32)$$

这是常向量 $\mathbf{v}$ 和本征值 λ 的线性代数方程。为说明一般方法的主要特性,我们假定矩阵 $\mathbf{L}$ 的有限维数是 n 。那么至多有 n 个不同本征值 λ_j 依赖于控制参量 α 。而如果至少有一个本征值取得非负实部,就会发生不稳定性,出现分叉。

这里可区分几种不同情况,如图 7—44 所示。其中,(a)表示当一个稳定分支失稳后,分叉出一个新的稳定分支;(b)表示分叉出两个稳定分支;(c)表示分叉出两个不稳定分支;(d)表示分叉出周期运动的即极限环型的分支。

分叉现象可以接连出现,从而形成分支树。控制参量可通过第 $1, 2, \dots, n$ 个临界点,从而就会出现多次分叉,出现二级及高级分支,如图 7—45 所示。A 表示初始分支, B 与 C 为一级分支,以此类推。通过多次分叉,系统可呈现出非常复杂的时空行为。首先,由于多次分叉,在超临界区系统可处于许多不同的状态,如在图 7—45 中二级分叉后系统有四种稳定状态。特别重要的是,高级分支的出现给物

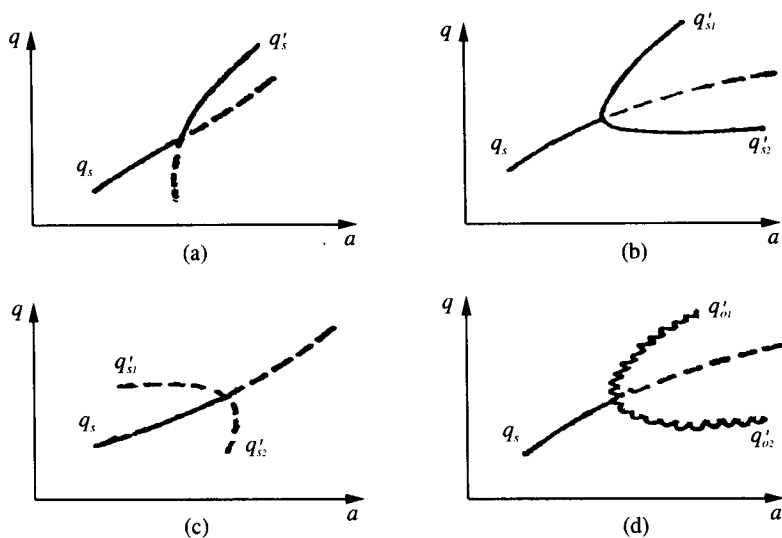


图 7—44 从定态解 q_s 通过本征值变化发生的分叉现象

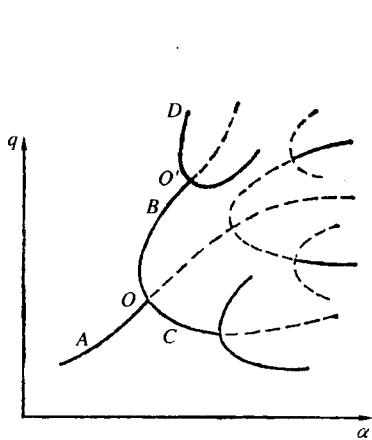


图 7—45 多级分叉现象

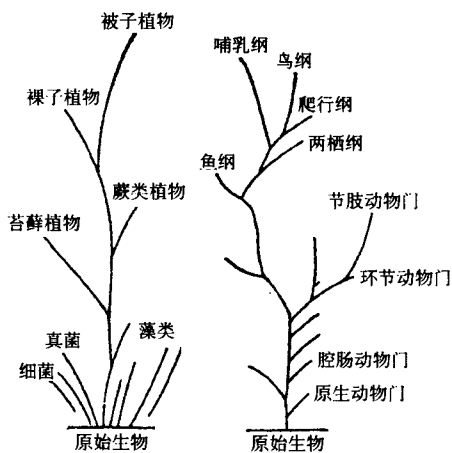


图 7—46 植物系统树(左)和动物系统树(右)

理学和化学现象赋予了“历史”或“记忆”，而这些特征以往被认为是社会系统和生物体所特有的。例如在图 7—45 中， D 分支上的某一点是通过分叉点 O 和 O' ，沿着 A 和 B 演变来的，而不是从 C 演变来的。这就意味着高级分支上某点的现状乃是它由之产生的所有历史过程的结果，它虽然含有某些突现的特殊的现时信息，但是又贮存着它的过去的信息。因此，分支树的确反映了系统进化的历史过程，正如生物系统树（见图 7—46）反映了生物进化的历史过程一样。

二、常见的几种分叉现象

当控制变量发生变化时，系统进化方程的解也发生变化。与之对应，在相空间中可“观察”到吸引子的分叉。下面，我们要用图示法定性地考察各种分叉现象^①。

1. 单结点分叉为双结点

从图 7—41、7—42 和 7—43 中易知，以方程 (7.19) 表示的系统，当本征值 $\lambda < 0$ 时，解为一个稳定结点；当 $\lambda > 0$ 时，解有两个稳定结点。当 λ 由负变正时，原来的单结点分叉为双结点。

一个稳定结点分叉为两个稳定结点，可以有两种方式，如图 7—47 所示。在上图中，分叉前后的流程图被绘制于同一个平面上。图

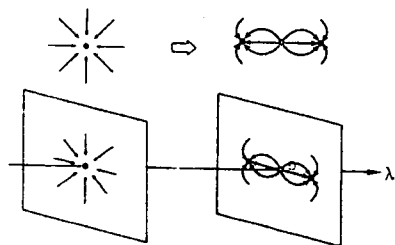


图 7—47 单结点分叉为双结点

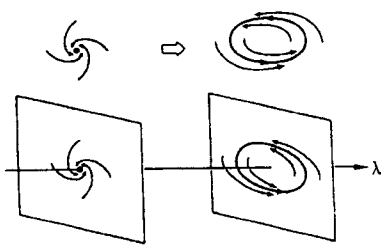


图 7—48 焦点分叉为极限环

① Haken H. *Advanced Synergetics*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 36—42

中,将 λ 取作横坐标,而绘有流线图的两个平面与 λ 轴相垂直。图中容易得知,分叉前的一个结点与分叉后的两个结点之间不可能建立一一对应的映象。

2. 焦点分叉为极限环

这种分叉通常叫作霍普夫(Heinz Hopf, 1894—1971)分叉。这时,系统有两个复共轭本征值:

$$\lambda_1 = \lambda' + i\omega, \quad \lambda_2 = \lambda' - i\omega \quad (7.33)$$

其中 λ' 、 ω 为实数且不等于零, ω 表示振荡频率。当这两个本征值穿越虚轴时,实部改变符号,系统失稳, $\lambda' \geq 0$ 。系统中出现振荡,原来的稳定焦点分叉为一个极限环。霍普夫分叉也有图7—48所示的两种情形。

由焦点到极限环的霍普夫分叉可以形象地理解如下。在一个稳定焦点附近,代表系统运动状态的流线从周围汇聚到焦点,如图7—49(a)所示。当这个焦点变得不稳定时,所有的流线都向外散开,如图7—49(b)所示。假定控制参量的小变化使稳定焦点失稳,焦点附近的局部情况就要由图7—49(a)变到(b)。但是,如果参量的这种小变化还不足以使整个流域内“河水倒流”,那么距焦点较远处的流线仍然向中央汇聚。近处向外,远处向内,结果在某个适当位置上出现一条封闭曲线,成为内外两种流线的共同极限,如图7—49(c)所示。这就是一个极限环。类似的几何考虑也可用于理解高维环面的

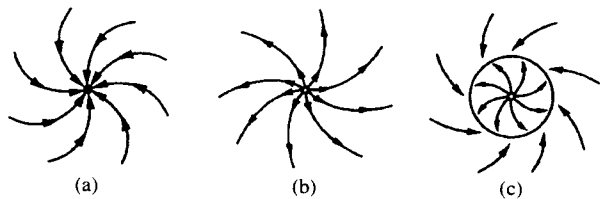


图7—49 霍普夫分叉原理示意图

形成。

3. 极限环的分叉

在许多实际情形中,控制参量的进一步变化可能导致极限环的不稳定。考虑到极限环上的运动是以含时的 $q_0(t)$ 描述的,需要扩展式(7.31)的线性稳定性分析。于是式(7.30)中的 L 变成时间 t 的周期函数。这时,我们仍可以用式(7.31)中的 λ 来研究系统的稳定性。当极限环失稳并发生分叉时,可出现下列几种情况。

(1) 如果单个实数本征值 λ 由负变正,原极限环可分裂为两个新极限环,如图 7—50 所示。原极限环变成不稳定的,图中以虚线表示。图 7—51 表示分叉前后变量 $q_1(t)$ 的时间行为,实线和点划线表示稳定极限环的 $q_1(t)$,虚线表示不稳定极限环的 $q_1(t)$ 。

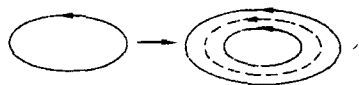


图 7—50 一个极限环分叉为
两个极限环

变为不稳定的原极限环以虚线表示

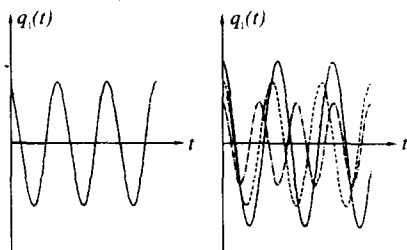


图 7—51 极限环在分叉前(左)和分叉后
(右)变量 $q_1(t)$ 的时间特性

(2) 如果一个复共轭本征值式(7.33)取得正实部,一个新极限环就叠加在原极限环上。解向量 $q(t)$ 的这一新运动可视为环面上的运动,即一种准周期运动。例如在图 7—52 和图 7—53 中,二维空间的极限环分叉为三维空间的极限环。根据本章第 3 节的讨论可知,如果轨道是闭合的,就有一个新极限环;如果轨道不闭合,轨道就会充满整个环面,即极限环分叉为环面,如图 7—54 所示。

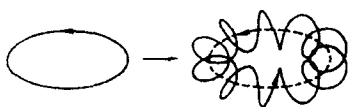


图 7—52 一维极限环分叉为
二维极限环

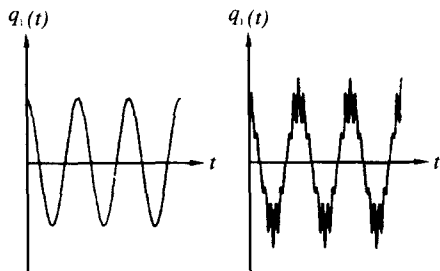


图 7—53 极限环分叉前(左)与分叉后
(右)变量 $q_1(t)$ 的时间行为

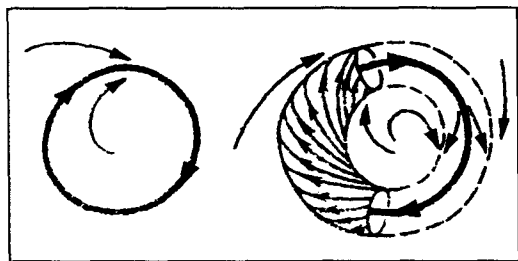


图 7—54 极限环分叉为环面

(3) 当一个极限环失稳时,还可能出现一个新的周期倍增的极限环。这也叫次谐波现象,在电子学中是早已熟知的现象。杜芬 (Georg Duffing, 1861—1944) 方程

$$\ddot{x} + k\dot{x} + x^3 = A \cos t \quad (7.34)$$

描述非线性振子对周期驱动力的响应。设 $q_1 \equiv x$, $q_2 \equiv \dot{x}$, 则杜芬方程的一条轨道从 (q_1, q_2, t) 空间到 (q_1, q_2) 平面的投影可示为图 7—55。从(a)到(b)再到(c)的演变序列是控制参量 A 的增加所致。显然, (a) 为一个极限环, (b) 的周期为 (a) 的两倍, 而 (c) 的周期又为 (b) 的两倍。这是倍周期分叉的一个典型例子。从 (a) 到 (b) 的变化意味着原来的周期轨道劈裂为二, 劈裂的程度可以微乎其微, 但绕行一周

的时间增加为原来的二倍,而由(b)到(c)的劈裂使绕行一周的时间增加到原极限环的四倍。值得注意的是,至少在三维相空间中才能既发生轨道的劈裂,又保证轨道互不相交。现已发现,在大量系统中连续的倍周期分叉是产生混沌吸引子的一个重要方式。

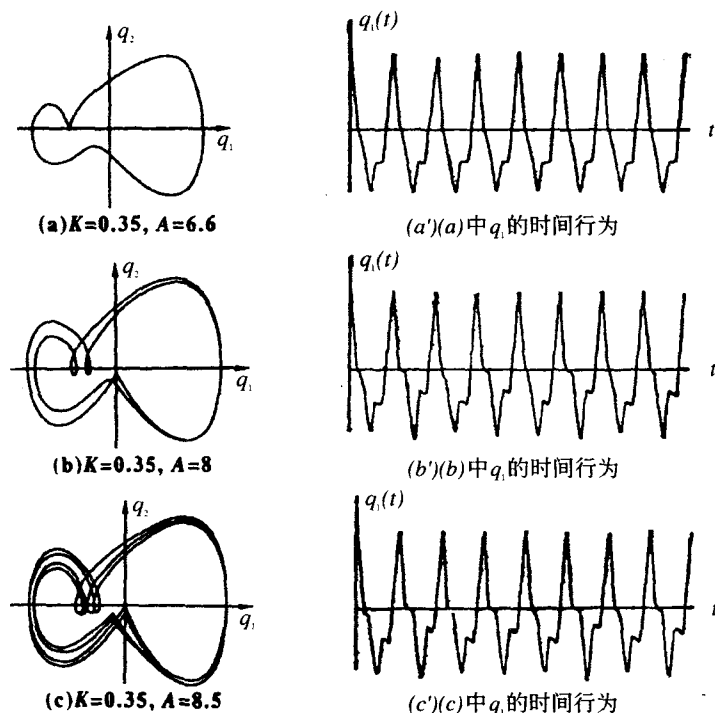


图 7—55 极限环的倍周期分叉

4. 环面的分叉

一个环面分叉为相同维数或较高维数环面的问题也受到人们重视。数学分析表明,系统的基频 $\omega_1, \omega_2, \dots$ 的无理数条件起着决定性作用。如果这些频率彼此具有某种无理数,二维环面可能分叉为三维环面。进一步的研究表明,为确定实际系统是否产生这种分叉,必

须进行概率论证。在微观层次上涨落影响着实际频率,因此关于环面分叉的讨论必须考虑这些涨落。对于一个给定的系统来说,可能存在着控制变量或其他变量的某些区域,在那里可能相继发生环面分叉。但是当进入高维环面时,这种转变越发困难,最有可能出现的是混沌。

当控制参量的变化引起一个环面上的运动变为不稳定时,如果频率之比的无理数条件得不到满足,那么流 $q(t)$ 可能出现各种很不同的情况。一个环面可能崩溃回到极限环,系统突变到锁频状态,锁定在一个或几个频率上,然后经过倍周期分叉进入混沌区。图 7—56 所示的是功率谱 $I(\omega)$ 怎样显示锁频。左图表示在未锁定状态下,系统按两个基频 ω_1 和 ω_2 振荡。右图表示锁定状态下的功率谱。两个原频率 ω_1 和 ω_2 消失,频率 ω_0 取而代之。

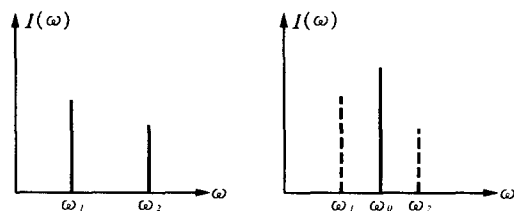


图 7—56 锁频现象

从以上的讨论可知,系统控制参量的变化达到一定程度就引起各种各样的分叉现象。在具体问题中,重要的是要阐明控制参量的变化达到何种程度时,系统以何种方式改变它的行为,原吸引子分叉为何种吸引子。显然,这是系统进化研究中的重要问题。

三、社会系统分叉实例

系统分叉的一般概念同样适用于社会系统。任何一种社会模式是政治体制、经济基础和文化背景以及其他各种社会因素的综合表现,而社会系统的这些状态变量受着控制变量——社会生产力的制

约。随着社会生产力的发展,社会的政治体制、经济基础和文化背景也或快或慢地发生变化。当这些变化达到临界区域时,原来的社会模式变得不稳定,随之发生社会模式的分叉,产生新的稳定的社会模式。在社会模式的不断演进中,这种转变过程不断重复出现,从而使社会系统不断地从低级阶段演进到高级阶段,从简单的社会模式演进到复杂的社会模式。这就是人类社会历史的基本过程。这就是人类社会进化的基本线索。与其他系统相比,人类社会系统的一个重要特点在于:在临界区域,虽然社会系统将进入哪个分支最终取决于社会环境(有时候还有自然环境)的选择,但是单个人或各种社会力量都努力使涨落朝着有利于自己的方向起作用,以此积极地影响选择过程。

1. 封建主义社会模式的分叉

作为社会模式分叉的一个典型现象,我们来考察封建主义社会模式的分叉。当一种封建主义社会模式发生失稳时,就发生社会模式的分叉。这里有两种情况。其一,不稳定性来自地主阶级与农民阶级的矛盾。这时,由于农民阶级不可能提出与封建主义社会模式不同的社会模式,结果即使原有的封建主义社会模式被推翻了,新出现的社会模式还是无法超出封建主义社会模式的范围。

其二,封建主义社会模式的不稳定性来自资本主义生产方式的产生和发展。但是,一方面,资本主义生产方式的承担者包括资产阶级和无产阶级,两者不可分割地联系在一起;另一方面,这两个阶级的利益在本质上是根本对立的。因此,资产阶级和无产阶级自从他们有了阶级意识的那天起,就分别提出了相互对立的社会主张。早在文艺复兴时期,当资产阶级思想家提出人文主义作为反封建旗帜的时候,无产阶级思想家却提出社会主义作为反封建反资本的旗帜。莫尔(Thomas More, 1478—1535)在《乌托邦》(1516年)一书中反对一切私有制,提出了自己的社会主义社会模式。因此,在理论上,当

资本主义生产方式造成封建主义社会模式失稳时,就发生社会动荡,出现两种发展前景,即资本主义和社会主义两种社会模式,如图 7—57 所示。

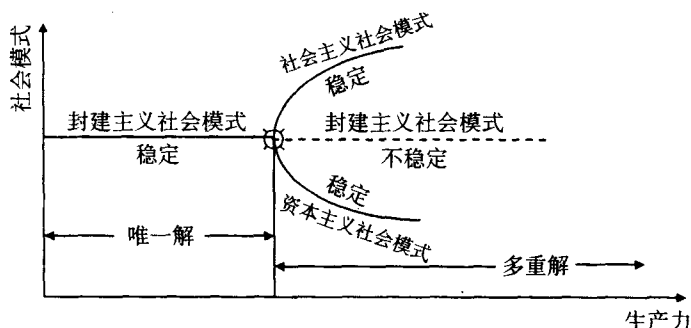


图 7—57 封建社会模式的分叉

图 7—57 还表示,资本主义社会模式和社会主义社会模式是建立在相同的生产力发展水平上的两种社会模式。显然,我们已经不能认为“蒸气时代是资产阶级的时代,电气时代是社会主义的时代”^①。从生产力水平上看,资本主义社会模式和社会主义社会模式处在同一个历史发展阶段,两者都有历史的合理性。当封建主义社会模式失稳时,一个社会究竟进入社会主义社会模式分支,还是资本主义社会模式分支,并不取决于当时的生产力发展水平,而是取决于原有社会模式的具体特性、临界区域中各种涨落和各种社会环境(以及自然环境)。

最早觉察到封建专制制度有可能不经过资本主义高度发展阶段或资产阶级专政阶段而进入社会主义社会的人是马克思和恩格斯。那是在 1848 年欧洲革命时期。他们指出:“德国正处在资产阶级革命的前夜”,而“德国的资产阶级革命只能是无产阶级革命

^① 列宁全集(第 30 卷). 北京:人民出版社,1957. 303

的直接序幕”^①。当时，马克思担任共产主义者同盟中央委员会主席，恩格斯担任委员。他们直接参加德国革命，为了在德国取得资产阶级民主革命的胜利，为了使无产阶级掌握革命的领导权，为了使德国资产阶级革命转变为无产阶级革命，作了大量的实际工作。但是，由于种种原因，德国革命失败了。德国革命的失败和后来的欧洲形势使得马克思和恩格斯未能更明确地阐述和展开封建专制制度有可能通过一段混乱和动荡，直接进入社会主义制度的思想。

但是，当西欧无产阶级在反对资本主义社会的斗争中屡遭失败的时候，无产阶级革命在俄国、中国等封建专制制度占主导地位的国家取得“意想不到”的胜利。结果，俄国于1917年、中国于1949年为向社会主义社会模式的过渡取得了决定性的胜利。这一结果与恩格斯在1847年的预言大不一样。当时的恩格斯认为：“共产主义革命将不仅是一个国家的革命，而将在一切文明国家里，即至少在英国、美国、法国、德国同时发生。在这些国家的每一个国家里，共产主义革命发展得或快或慢，要看这个国家是否工业较发达，财富积累较多，以及生产力较高而定。”^②但是后来的历史进程不仅没有为这一论断提供任何支持，反而表明一个资本主义国家越是生产力发达，越是难以实现社会主义革命。实际上，至今为止几乎没有一个典型资本主义国家的资本主义社会模式转化为社会主义社会模式。

这就表明，社会系统进化中的许多基本问题尚需进一步研究。例如，现存的各种社会模式将何去何从？将发生什么样的分叉？人类所向往的社会模式究竟如何并怎样实现它（们）？对这些问题，不仅要从理论上回答，而且要用实践来回答。

① 马克思恩格斯选集（第1卷），北京：人民出版社，1966，271

② 同上书，1966，211

2. 朝鲜半岛的分裂与统一

在中国,封建社会模式之分叉为资本主义社会模式和社会主义社会模式,以及这两种社会模式并存的“双稳态”的出现,是以在不同地区(即大陆和台湾)建立不同社会模式的方式成为现实的。但是由于大陆和台湾面积相差悬殊,这常被看作是一种纯粹偶然的现象。

在朝鲜半岛,封建主义社会模式之分叉为资本主义社会模式和社会主义社会模式,却使以统一的朝鲜半岛分裂为势均力敌的两个部分的方式得到实现。我们知道,在长期统一的封建王朝时期(包括统一新罗、高丽、朝鲜王朝)和沦为日本殖民地的时期,朝鲜半岛社会模式一直是同一的,朝鲜半岛南北在政治、经济、文化等方面的发展水平是大致相同的,社会模式是一致的。

朝鲜半岛的分裂始于日本的战败。当 1945 年 8 月日本侵略军被打败的时候,苏联军队于 8 月进驻朝鲜半岛三八线以北地区,同年 9 月美国军队登陆三八线以南地区。到了 1948 年,金日成和朝鲜劳动党在北半部成立朝鲜民主主义人民共和国,而李承晚及其支持者在南半部成立了大韩民国;前者发展成社会主义社会模式,后者发展成资本主义社会模式,如图 7—58 所示。

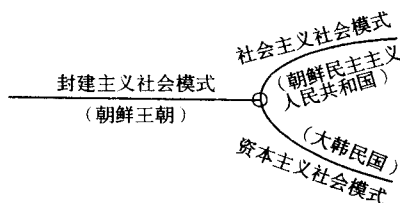


图 7—58 朝鲜半岛封建社会模式的分叉

显然,南北朝鲜的两种社会模式是以相同的生产力发展水平为基础,建立在统一的封建主义社会模式的废墟之上的。在朝鲜半岛,封建

主义社会模式向资本主义社会模式和社会主义社会模式的分叉付出了巨大的代价:在统一的朝鲜半岛上出现南北两个政权,统一的民族分裂为两个部分。两种社会模式的对立成为朝鲜半岛实现统一的主要障碍。

当然,讨论朝鲜半岛统一问题,除了南北两种社会模式外,还要考虑其他各种内生变量和外生变量及其相关关系。从中可导出未来一段时间内朝鲜半岛多种可能演进模式,见图 7—59,而实际得到实现的将只是其中之一。在未来一段时间内朝鲜半岛上仍然存在着维持分裂状态或实现统一的两种可能性。当维持分裂状态时存在着维持现今的敌对对峙状态或转化为和平共处状态的两种可能性,实现

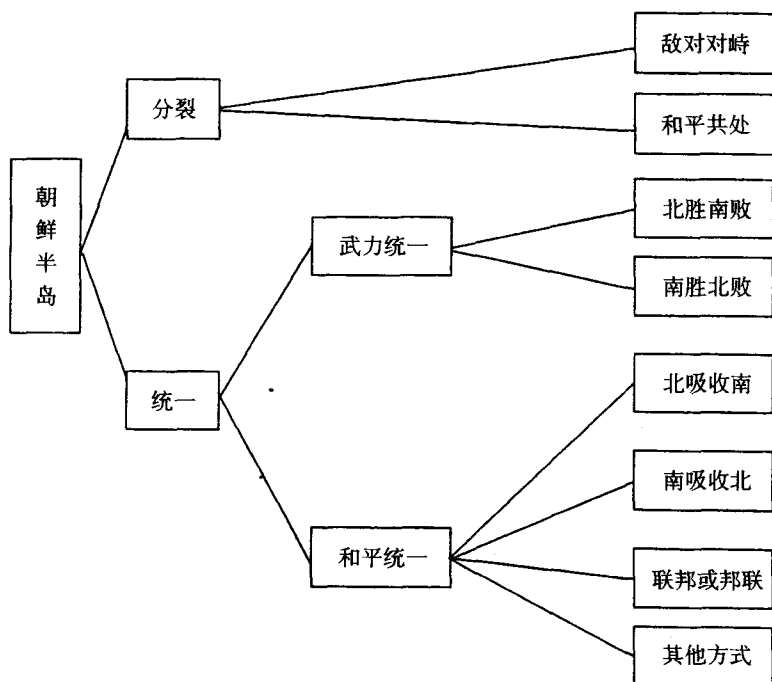


图 7—59 朝鲜半岛演进趋势模型

朴昌根. 全球化与韩国的应对. 汉城: 白山资料院, 2003. 486

统一也有通过武力实现统一或以和平方式实现统一的两种可能性；无论武力统一还是和平统一也有多种可能性。

进一步的研究将给出各种可能性转化为现实性的概率大小。大致上可以认为将在今后较长的一段时期内这几种演进模式的实现概率从大到小的次序为：南北方在维持分裂状态的情况下成功地实现和平共处的可能性最大，其次是以邦联制、联邦制或“欧盟”方式实现统一，再次是以“南吸收北”的方式实现统一，第四是在联合国监督下，或在其他由南北双方都认可的临时性国际机构的监督下，通过南北普选实现统一（即“其他方式”之一）。另一方面，以“北吸收南”的方式实现统一的可能性最小，继续维持敌对对峙状态的可能性也不大，而以南北全面战争的方式实现统一的可能性也不能完全排除。但是，因为某一统一模式实现概率的大小并不能决定它得以实现的时间次序，所以决不能简单地认为实现概率最大的状态就一定会得到实现。由于某些因素的不确定性突变，实际得到实现的也有可能是实现概率较小的其他模式。

7.4.3 相变

在以上分叉问题的讨论中，我们忽略了导致系统质变的一个决定性因素即涨落。但是，只要我们所考虑的是由大量要素组成的系统，只要我们所考虑的是发生物能耗散的开放系统，就不能从实际的质变研究中忽略涨落，尤其在分叉点（或临界点）更是如此。涨落使已足够困难的分叉问题转化成更复杂更困难的非平衡相变问题。不过，在这一部分我们主要讨论相变的一些基本特征，对于涨落问题我们将在第6节中作更详细的说明。

一、相与相变

系统内部的状态通常用“相”来表示。在物理和化学中，相是指具有相同成份及相同物理、化学性质的均匀物质部分。在系统研究

中,相概念已超出物理、化学领域,在更抽象的意义上使用。在最广泛的意义上,相可以理解为系统中具有相同的特定系统性质的均匀构成部分。例如,一杯水,其物理性质、化学组成是均匀的,故是一相。水、汽与冰,虽然其化学组成相同,但物理性质不同,故是三相。在气态下,水分子互不相关地自由运动;在液态

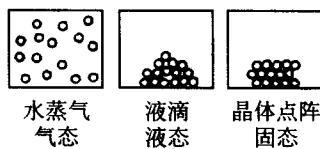


图 7—60 处于不同相的水

下,水分子之间保持一定的平均距离;在固态下,水分子完全以固定的秩序排列,如图 7—60 所示。一个社会的经济系统,如果认其所有制形式为相(或称组织模),那么个体经济、集体经济和国营经济就可视为三个相(或组织模)。

如果一个系统只有一个相,就称为单相系;如果有两个或多个相,就称为多相系。在多相系中,相与相之间有分界面。在物理、化学系统中,分界面通常是一目了然的,并且可以用机械方法把各相分隔开来。但在社会文化系统中,一般难以凭直观划分各相,“分界面”也难以精确确定,并且各相之间的渗透也极为严重。但这并不是说社会文化系统各相之间不存在“分界面”。不过,目前已建立较成熟理论的只是物理系统领域。

在一个系统中,相与相之间可以处于平衡,也可以发生互相转变。例如,物体的固、液、气三态可相互转变,固体的同素异形体也可以相互转变。在社会经济发展中,有经济相之间的转变。人们把一个相转变为另一相的现象称为相变。相变就其某种特定性质而言,显然是一个质变过程。

相变通常分为平衡相变与非平衡相变。为说明这两种相变的基本特征,我们先来说明平衡与非平衡的区别。

二、平衡与非平衡

在不同的学科中都广泛使用着“平衡”一词。这一概念首先是

在力学中发展起来的。如果一个物体同时受几个力的作用,而物体运动状态不发生任何变化,就说这个物体处于平衡状态,或者说这几个作用力相互平衡。例如,桌上放着的物体,就是在地球引力和桌面支持力的相互平衡下不改变其运动状态,即处于平衡状态。

在热力学和统计物理中使用的“热力学平衡”或“热动平衡”的概念是力学平衡概念的扩展。所谓热力学平衡,是指在一定外界条件下,物质系统的宏观状态保持不变。这时,从宏观上看,系统不发生任何物理、化学变化;从微观上看,热力学平衡系统并不是静止不动的,质点处在不断的运动中。更确切地说,从微观上看,热力学平衡的系统处在动态平衡,在系统中不同方向的运动在不断进行,但它们势均力敌,相互抵消。例如,密闭容器内水和汽的平衡,并不是指水与汽二者之间没有变化,而是指水转化为汽和汽转化为水的速度相等。化学平衡也是如此,意味着反应物变为生成物和生成物变为反应物的速度相等。

当一个系统处于热力学平衡状态时,实则包含着下列三种平衡:第一,系统处于热平衡,即系统内部温度处处相等;第二,系统处于“力”平衡,即系统内部压力(即物理学上的压强)处处相等;第三,系统处于相平衡,即系统内部化学势处处相等。

对孤立系统来说,热力学平衡态是高熵态,是无序的;对封闭系统来说,如果系统的温度足够低,则有可能形成低熵有序结构,如晶体、液体等。这种有序结构是热力学平衡态下的静态结构。

但是,平衡是相对的、特殊的、暂时的和局部的,而不平衡是绝对的、普遍的、永恒的和全局的。系统一旦离开平衡态,就处于非平衡态。非平衡态分为近平衡态与远离平衡态。

近平衡态是指与平衡态只有微小距离的状态。在近平衡态下,系统的主要运动趋势是走向平衡。这就需要研究一些在研究平衡

态时未曾考虑过的过程。首先,近平衡系统在引起非平衡的扰动被消除后就会自发地回到平衡态。这个过程称为驰豫过程,驰豫过程所经历的时间称为驰豫时间。其次,如果强行维持使系统处于非平衡的外界条件即“力”(如温度差、电位差、浓度差等),就会引起持续不断的“流”(如热流、电流、粒子流等)。这个过程称为输运过程。输运过程伴随着一定的能量消耗,因而也是耗散过程。第三,宏观的平衡态对应着瞬息万变的微观运动,是微观运动的一种平均的表现。因此各种宏观参数总是在平均值附近上下摆动,这称为涨落过程。

驰豫、输运与涨落是近平衡区的主要的非平衡过程,而这些过程都服从于走向平衡这一总的趋势,因此有深刻的内在联系,由一些共同的规律相互联系。其中最主要的是输运系数对称原理和涨落耗散定理。输运系数对称原理是说,在近平衡区,由力 X_l 产生流 J_k 的输运系数 L_{kl} 与由力 X_k 产生流 J_l 的输运系数 L_{lk} 是相等的,即是说,在

$$J_k = \sum_l L_{kl} X_l \quad (7.35)$$

中各系数 L_{kl} 的矩阵是对称的:

$$L_{kl} = L_{lk} \quad (7.36)$$

这个关系通常也叫作翁萨格(Lars Onsager, 1903—1976)倒易关系。

涨落耗散定理是说,输运系数由相应物理量的涨落平均值决定,或者说其涨落与输运(耗散)系数成比例。

此外,最小熵产生原理指出,线性非平衡区的系统随着时间的推移,总是朝着熵产生减少的方向进行,而定态的熵产生取极小值。

在近平衡态的这些理论能否推广到离平衡较远状态的问题上,人们遇到了严重的困难。当延长系统同平衡态的“距离”时,各种物理过程的个性表现得过分突出,难以建立普遍的理论。

但是,人们却惊奇地发现,在远离平衡的情况下,反而出现一些

带有普遍性的现象。许多系统在远离平衡情况下突然进入新的更有序的状态,形成所谓耗散结构。下面将看到,耗散结构的产生可以用非平衡相变来说明。

三、平衡相变与非平衡相变

1. 平衡相变

系统在平衡状态下发生的相变,称为平衡相变。例如,在平衡状态下,气、液、固三态的转变,铁磁体和顺磁体的转变,金属的超导转变等,均属于平衡相变。

平衡相变,根据表征相变的是化学势的一阶偏导数还是二阶偏导数,区分为一级相变和二级相变。

常见的气、液、固三相的相互转变是一级相变。在一级相变中,物质的化学势(μ)不变,但化学势的一阶偏导数所代表的物性(如比容 v , 摩尔熵 S)发生突变。其热力学关系可表示为

$$\left. \begin{aligned} \mu_2 &= \mu_1 \\ v_2 &\neq v_1, \text{ 即 } \frac{\partial \mu_2}{\partial P} \neq \frac{\partial \mu_1}{\partial P} \\ S_2 &\neq S_1, \text{ 即 } \frac{\partial \mu_2}{\partial T} \neq \frac{\partial \mu_1}{\partial T} \end{aligned} \right\} \quad (7.37)$$

在一级相变中有相变潜热 L 的吸收或释放,即

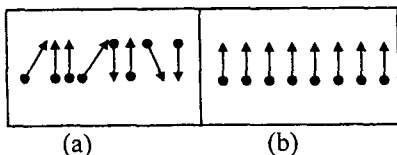
$$L = T(S_2 - S_1) \quad (7.38)$$

并且,化学势的一阶偏导数在临界点(相变点)是不连续的,即是说,化学势 μ 的一阶偏导数 $\partial\mu/\partial P$ 与 $\partial\mu/\partial T$ 在临界点前后取不同的值。

但是在超导、超流、铁磁、铁电等相变中,情况就不同。在这类相变中,物质的化学势不变,化学势的一阶偏导数也不变,但化学势的二阶偏导数所代表的物性(如比热容 C_p 、膨胀系数 α 和压缩系数 k)发生突变,因此称为二级相变。其热力学关系可表示为

$$\left. \begin{aligned}
 \mu_2 &= \mu_1 \\
 v_2 &= v_1 \\
 S_2 &= S_1, \text{ 即 } \frac{\partial \mu_2}{\partial T} = \frac{\partial \mu_1}{\partial T} \\
 C_{p_2} &\neq C_{p_1}, \text{ 即 } \frac{\partial^2 \mu_2}{\partial T^2} \neq \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial T^2} \\
 \alpha_2 &\neq \alpha_1, \text{ 即 } \frac{\partial^2 \mu_2}{\partial T \partial P} \neq \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial T \partial P} \\
 k_2 &\neq k_1, \text{ 即 } \frac{\partial^2 \mu_2}{\partial P^2} \neq \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial P^2}
 \end{aligned} \right\} \quad (7.39)$$

二级相变中没有潜热的吸收或释放(因 $S_2 = S_1$), 并且化学势的二阶偏导数在临界点是不连续的, 即是说, 二阶偏导数 $\partial^2 \mu / \partial T^2$ 、 $\partial^2 \mu / \partial T \partial P$ 及 $\partial^2 \mu / \partial P^2$ 在临界点前后取不同的值。



例如, 铁磁体的磁化过程是图 7—61 (a) 元磁体无规指向 ($T < T_c$); 二级相变的一个典型例子。铁磁体是由大量元磁体组成的。在高温下, 各元磁体的指向是无规则的, 它们的磁性相互抵消, 无法形成宏观磁矩, 见图 7—61(a)。当温度下降到临界温度 T_c 时, 各元磁体排列成行, 从而产生宏观磁矩, 见图 7—61(b)。这样, 当一块铁磁体被加热到一定温度时, 它会突然失去磁性; 当它的温度降低到临界温度时, 它会突然重新获得磁性。在超导体中也能观察到类似现象。当温度降低到临界值时, 某些金属和合金的电阻就突变为零, 如图 7—62 所示。超导现象是在低温下金属中电子有序排列的结果。

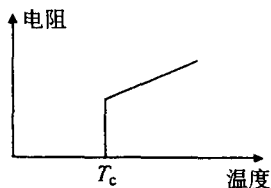


图 7—62 超导体的电阻
作为温度的函数

一级相变和二级相变既有共同点又有一些区别。两者的共同点是:不论一级相变还是二级相变,都是物质结构有序度的一种改变,都是质变现象。它们都有一个临界点 T_c ,在 T_c 以下序参量不为零;当 $T \rightarrow T_c$ 时序参量趋于零;在临界点 T_c 处,发生对称的破坏,而且是跃变式的。

这两种相变的主要区别在于:首先,一级相变是物态的突变,如水变成汽,而二级相变是同一物态中对称结构的突变,如铁磁体变为顺磁体。一级相变点是两相化学势 μ_1 与 μ_2 相等的点,可能出现过热或过冷现象,但二级相变点是热力学的某种奇点,特别是热力学(吉布斯函数)的奇点,不可能有过热或过冷现象。其次,从式(7.37)和(7.39)可知,一级相变属于不连续相变,而二级相变属于连续相变。在一级相变中,以物态为表征的有序结构的建立(或破坏)是突然发生的,所以在相变过程中需要释放(或吸收)潜热,相变前后系统的熵不相等。但在二级相变中,物态与化学势的一阶偏导数不变,在相变点没有吸收或释放潜热的现象。在二级相变中,物态不变,但随着温度升高(或下降),有序结构破坏(或建立)的速度也越来越快,因而到了相变点,热容量发生突变。

2. 非平衡相变

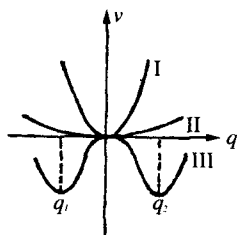


图 7—63 势函数
曲线的变化

我们在本章第三节看到了在连续介质力学、物理学、化学、生物学、生态学等领域里发生的各种无序—有序转变、有序—有序转变或有序—混沌转变的实例。这些现象都是在非平衡状态下发生的。但是这些转变与上面谈到的平衡相变有许多相似之处。

例如,如将图 7—41(a)与(b)合在一起,就有图 7—63。当 $\alpha > 0$ 时只有一个稳定点 $q = 0$;当 $\alpha < 0$ 时有两

个稳定点,而 $q=0$ 的点变为不稳定的。即是说,当我们将 α 从正值逐渐改变至负值时,在 $\alpha=0$ 时,原来的稳定平衡位置 $q=0$ 变为不稳定的,系统的状态或者进入稳定点 q_1 ,或者进入稳定点 q_2 ,不能同时处于 q_1 和 q_2 。

这就说明在 $\alpha=0$ 处发生了对称破缺,发生了分叉。又,当我们改变控制参量,使之从 $\alpha>0$ 变为 $\alpha<0$ 时,势曲线从 I 变成 II,再变成 III,在 $q=0$ 附近势曲线的斜率越来越小,变得越来越平坦,因而粒子沿势曲线落下的速度变得越来越慢,这一现象就是所谓的临界慢化。当势函数曲线变得越来越平坦时,粒子的运动范围变得越来越大,这是由于在临界点附近涨落变得特别大,这时的涨落称为临界涨落。这表明,非平衡系统在关节点发生质变时,有很多现象(即临界慢化、临界涨落、对称破缺等)显示出与平衡相变中的一级相变或二级相变的相似性。人们把非平衡系统中的这些质变现象统称为非平衡相变。

当然,非平衡相变与平衡相变有着一些根本性的区别。例如,非平衡相变包括振荡、空间结构和混沌。平衡相变通常是在热力学极限下研究的,其中样本体积被取为无穷大,而在大多数非平衡相变中样本的几何性质起着决定性作用,并导致相当不同的结构。

下面,我们从与平衡相变的比较中看非平衡相变的一些共同特征^①。

(1) 非平衡相变只能在远离平衡的非平衡区发生,不可能在近平衡的非平衡区发生,而平衡相变是在平衡状态下发生的。

(2) 与平衡相变一样,非平衡相变也是在某个参数达到一定临界值时才发生的,其有序—无序转变的性质与平衡态二级相变相似。例如,激光形成时光波的相位和频率的突变有序,就与二级相变中顺磁分子磁矩在居里点处产生宏观磁矩的有序突变相似。

① 湛垦华等. 普利高津与耗散结构理论. 西安:陕西科学技术出版社,1982. 282—283

(3) 非平衡相变是在同一物态中的相转变,而不涉及物态之间的相转变,当然也就没有物态转变时出现的潜热的释放和吸收。在这一点上,非平衡相变与二级相变雷同,与一级相变不同。

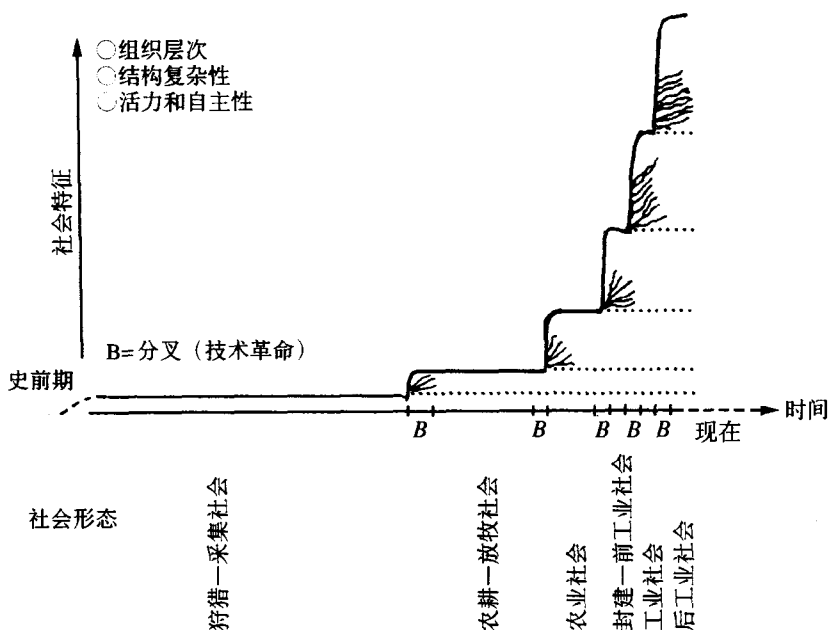
(4) 非平衡相变的结果是在远离平衡的非线性非平衡状态中形成稳定有序的动态结构,即所谓耗散结构。这种结构有与平衡结构类似的稳定性,不会因外界条件的微小改变而消失。但是为了维持这种结构的稳定,必须随时有外界物能的补充。如果不能充分地获取外界的物能,耗散结构立刻就瓦解。也就是说,耗散结构是在不断的物能流中才能持续存在。这与平衡相变的情况完全不同。平衡相变后的新结构(如晶体)不需要由物能流来维持其稳定。耗散结构是“活”的结构,平衡结构是“死”的结构。例如,我们在生物、社会、经济、文化等系统中看到的有序结构都是“耗散结构”,而不是平衡结构。

7.5 系统进化的方向性与周期性

7.5.1 层间进化与层内进化

通常,人们将系统进化的一般趋势表示为由简单到复杂、由低级到高级、由类型少到多、由适应性弱到强的演进过程。这已在大量具体系统中得到了广泛的说明。但是,由于这几种描述并非基于统一标准,难免发生它们之间的相互矛盾或对立。

更细致的研究表明,系统进化的一般趋势应该从两个方面考察。其一是所谓层间进化,表示不同系统层次之间的转变,即系统从低层次到高层次的进化。层间进化可分为两种模式,即耦合模式和内生模式。前者表示若干个低层次系统的耦合产生高层次系统。例如,不同原子结合成分子,不同分子结合为一个物体,核酸和蛋白质结合成原生细胞,多个细胞结合成多细胞生物,多个生物个体结合成群



（时间尺度仅供示意）

图 7—65 社会进化的主要阶段

拉兹洛 E. 进化——广义综合理论. 北京: 社会科学文献出版社, 1988. 102

其二是所谓层内进化, 表示系统在同一层次内从简单到复杂的进化, 即从简单结构到复杂结构的进化。例如, 在原子层次上, 有从最简单的氢原子到各种复杂原子的变化序列; 在分子层次上, 有从简单的无机物分子到复杂的生物大分子的进化; 在生物体层次上, 有从简单的单细胞生物到最复杂的生物即人类的演进; 在社会层次上, 有从狩猎—采集社会到现代社会的进化。

一般来讲, 在总的系统进化过程中, 既有层间进化, 又有层内进化, 两者通常是相互交错在一起的。但是, 两者之间存在着内在的确定的关系, 那就是: 当某一层次系统的复杂度增大到该层次系统所无法容纳的程度时, 该系统就有可能从该层次演进到高层次, 而在新生

的层次上,系统将重演从简单到复杂的进化。这就为系统进化中出现周期现象提供了可能性。

无论系统的层间进化还是层内进化都是质变过程。在层间进化中,不同层次系统之间的质的区别是显而易见的。即使在层内进化中,系统从简单到复杂的进化也不是单纯的量的积累,而是伴随着质的转变,不是同一结构在空间上的放大,而是伴随着结构性质的转变。当然,层间进化中所考察的系统质与层内进化中所考察的系统质有着不同的具体含义。

还需要指出的是,由于系统层次的划分具有相对性,同一个进化过程在有的情况下被当作层间进化,在另一情况下却被当作层内进化。例如,当我们所考察的是整个生命系统的进化时,社会系统被当作一个特定层次,因而社会系统从狩猎—采集社会到现代社会的所有变化就被当作层内进化。但是,当我们所考察的是社会结构的演进时,社会系统从狩猎—采集社会到现代社会的各个阶段可以且应当看作是层间进化。

7.5.2 层内进化的描述

目前,系统的层内进化主要有两种描述方法。其一是通过系统进化方程的讨论,考察各种吸引子之间的转变;其二是从系统的结构特征出发,考察系统从简单结构向复杂结构的转变。

一、条条道路通混沌

在数理科学领域,人们已发现,系统在层内进化中要经历从一种模式到另一种模式的依次转变。如果只考虑时间模式,就可看到定态、周期运动、准周期运动、混沌运动以及这些运动模式之间的转变,也就是不动点、极限环、环面、混沌吸引子以及这些吸引子之间的转变。这里十分重要的是,这些吸引子的转变可形成一个序列,这个序列的起点是不动点,终点是混沌吸引子,因此人们甚至说“条条道路

通混沌”。下面,我们看通向混沌的几种不同方式。

1. 理想情形

朗道(Lev Davidovich Landau, 1908—1968)和霍普夫在 20 世纪 40 年代曾先后独立提出过这样的湍流发生机制:当用来比较粘滞流体流动状态的雷诺数 $R = \rho l v / \eta$ (ρ 、 η 、 v 分别表示流体的密度、粘滞系数、流速, l 为物体的线度)很小时,流体处于和时间无关的层流状态,对应于相空间中的不动点。当 R 达到第一个临界值 R_c 时,不动点失稳,分叉为极限环,即出现频率为 ω_1 的振荡状态。这就是霍普夫分叉。 R 继续增大,极限环又失稳。突然出现另一新频率 ω_2 ,系统在两个基频上振荡,即极限环分叉为二维环面。朗道设想,这种分叉相继发生,系统向维数更大的环面发展。在每一步,新频率 ω_i 被添加到原有基频集合上去。当基频的数达到无穷大时,就出现湍流,即是说,湍流被看作是无穷维环面上的运动。但是,后来人们从理论和实验上已基本否定了朗道—霍普夫的湍流发生机制。

茹勒(David Ruelle, 1935—)和塔肯斯(Floris Takens, 1940—)于 20 世纪 70 年代初证明,根本不必出现无穷多个不可约的频率,只要四次分叉就可以产生湍流,即他们所提出的进化序列是:不动点→极限环→二维环面→三维环面→奇怪吸引子(湍流)。后来,他们又指出,达到二维环面后,下一步的分叉不必达到三维环面,即三个基频上的准周期运动,二维环面可直接失稳而转变为奇怪吸引子。流体研究中的一些实验支持了茹勒—塔肯斯的湍流发生机制。

又一很重要的问题是,茹勒和塔肯斯设定各频率是接近于有理数的。但茹勒—塔肯斯道路能解释一些现象,不能解释另一些现象。实验表明,二维环面既可转变为混沌,又可转变为三维环面。这样,哈肯认为,如果诸频率具有彼此之间的某种无理数,从二维环面到三

维环面的分叉是完全可以发生的。因此,为决定一个实际系统是否发生这种转变,必须进行概率论证。对于一个给定的系统来说,可能存在控制参量或其他参量的一些区域,在这些区域中低维环面可以相继地转变为高维环面。但是随着环面维数的增高,这种转变变得越来越不可几,因此在高维情况下最可能出现的是混沌,也就是说,在这种情况下朗道—霍普夫道路失去其有效性。

通过以上的讨论,我们可以把系统从简单到复杂的总的进化序列表示为

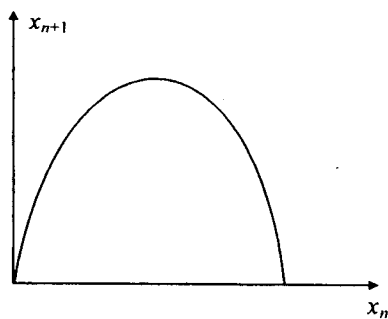


2. 倍周期分叉序列

通向混沌的这一道路亦称费根保姆序列。这是目前研究得最细致的一条通向混沌的道路。这里,混沌不是来自环面的分叉,而是来自极限环的无穷多次的倍周期分叉。从物理上看,朗道—霍普夫道路中未考虑的锁频现象起着重要作用。在一些实验中,流体中出现的两个不可约的频率可以相锁在单一频率上,那么相应的极限环就可以沿着最终要导致混沌的倍周期序列发生进化。按照哈肯的解释,在这种情况下,系统由少数几个序参量控制,而倍周期序列就在相应序参量的低维空间上发生;其维数至少是三。对于耦合的振子系统而言,非线性振子在相当弱的耦合下就可锁频到线性振子的基频或分频上,随之展现倍周期分叉序列。

倍周期分叉序列可用微分方程(如前面已述的杜芬方程)来描述,亦可用离散映象来描述。作为一维映象的一例,我们看逻辑斯蒂(logistic)映象,记为

$$x_{n+1} = \alpha x_n (1 - x_n) \quad (7.40)$$

图 7—66 方程(7.40)中 x_{n+1} 与 x_n 的关系呈一抛物线

这是生态学中的种群模型。此方程的图形如图 7—66。如果 $0 \leq \alpha \leq 4$, 则 $0 \leq x_n \leq 1$ 中任何值的映象都在 $0 \leq x_{n+1} \leq 1$ 区间。对此方程的讨论可得到有趣的结果。

如果消去非线性项 x_n^2 , 就得到种群数每年按一定比率稳定无限增长的线性模型, 如图 7—67(a) 所示。

如果 $0 < \alpha < \alpha_1$, 即方程的非线性程度很小, 则 x_n 收敛于 0, 导致种群灭绝, 如图 7—67(b) 所示。

如果 $\alpha_1 < \alpha < 3$, 则 x_n 收敛于一个不动点, 种群数最终达到一个定值, 如图 7—67(c) 所示。

如果 $3 < \alpha < \alpha_2$, 则 x_n 收敛于周期为 2 的极限环, 种群数发生周期振荡, 如图 7—67(d) 所示。

如果 $\alpha_2 < \alpha < \alpha_3$, 则 x_n 收敛于周期为 4, 8, $\dots$ 的极限环(参看图 7—68), 而当 $n \rightarrow \infty$ 时出现混沌, 种群数不可预测, 如图 7—67(e) 所示。

费根保姆的一个重要发现是, 很大一类非线性映象在通过倍周期分叉序列进入混沌的时候, 遵循着同样的规律, 受到同一个常数即费根保姆数的支配。这就是单峰映象。设一维迭代方程

$$x_{n+1} = f(\alpha, x_n) \quad (7.41)$$

中, 函数 $f(\alpha, x)$ 在区间 I 上仅有一个最大值 $f_{\max} = f(\alpha, x_c)$, 那么最大值附近可展开为

$$f(\alpha, x) = f_{\max} - \alpha(x - x_c)^z + \dots, \quad (7.42)$$

而在其他地方只要分段光滑即可。单峰映象的许多性质与函数

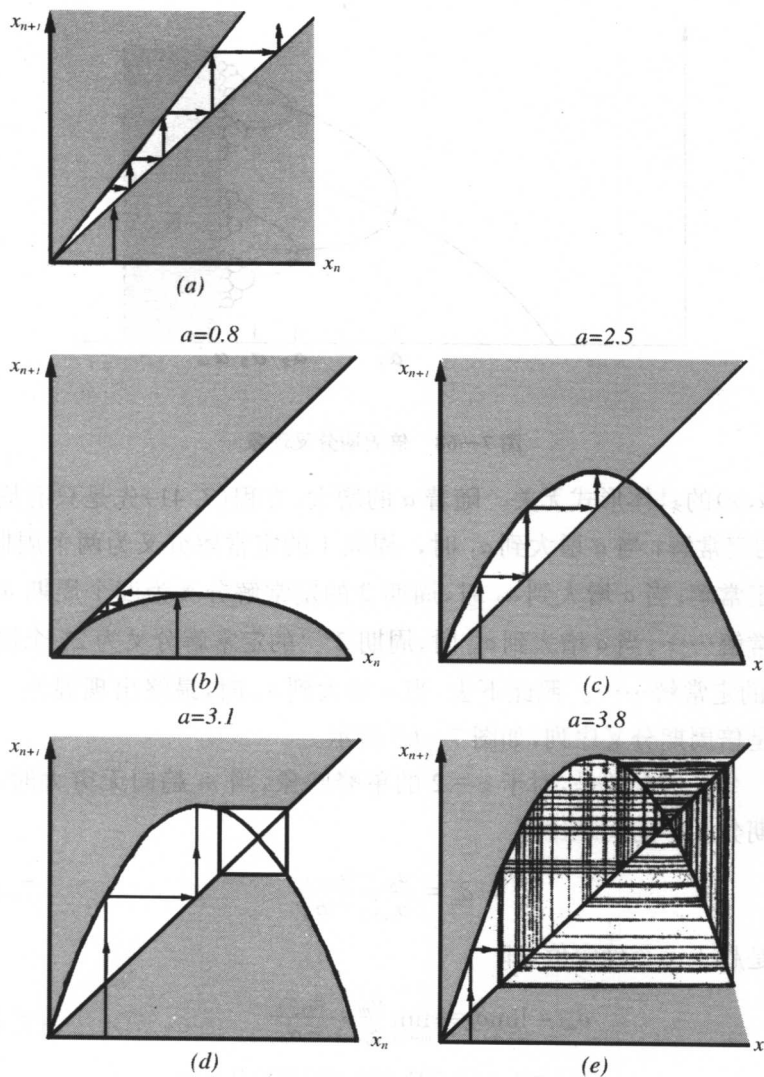


图 7—67 种群数增长模型

格莱克 J. 混沌. 上海: 上海译文出版社, 1990. 188

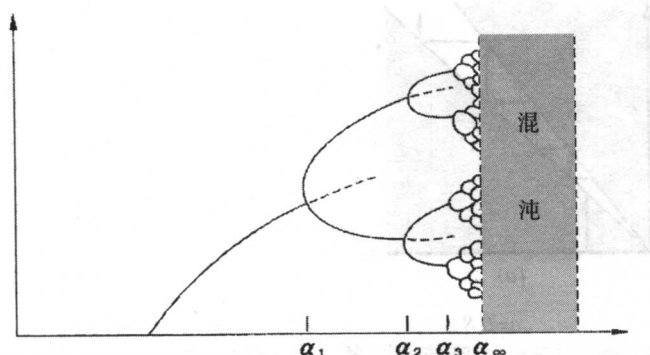


图 7—68 倍周期分叉现象

$f(\alpha, x)$ 的具体形式无关。随着 α 的增大, 方程 (7.41) 先是只有周期 1 的定常解; 当 α 增大到 α_1 时, 周期 1 的定常解分叉为两个周期 2 的定常解; 当 α 增大到 α_2 时, 周期 2 的定常解分叉为四个周期 4 的定常解……; 当 α 增大到 α_m 时, 周期 2^{m-1} 的定常解分叉为 2^m 个周期 2^m 的定常解……。照此下去, 当 α 增大到 α_∞ 时, 最终出现混沌。这就是倍周期分叉序列, 如图 7—68 所示。

令人惊奇的是, 对于 $z=2$ 的单峰映象, 当 m 趋向无穷大时, 倍周期分叉中的间距比值

$$\delta_m = \frac{\alpha_m - \alpha_{m-1}}{\alpha_{m+1} - \alpha_m} \quad (7.43)$$

总是趋于一个确定值, 即

$$\begin{aligned} \delta_\infty &= \lim_{m \rightarrow \infty} \delta_m \equiv \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\alpha_m - \alpha_{m-1}}{\alpha_{m+1} - \alpha_m} \\ &= 4.669\,201\,609\,102\,990\,9\cdots \end{aligned} \quad (7.44)$$

如果以方程 (7.40) 为例, 倍周期分叉序列中的间距比值 δ_m 的变化情况如表 7.1 所示。

表 7.1 费根保姆数在 $x_{n+1} = \alpha x_n(1-x_n)$ 中的出现

m	分叉情况	分叉值 α_m	间距比值 δ_m
1	1 分为 2	3	
2	2 分为 4	3.449 489 743	4.751 466
3	4 分为 8	3.544 090 359	4.656 251
4	8 分为 16	3.564 407 266	4.668 242
5	16 分为 32	3.568 759 420	4.668 74
6	32 分为 64	3.569 691 610	4.669 1
.....			
.....			
∞	周期解 $\rightarrow$ 混沌	3.569 945 972	4.669 201 609

如果以方程

$$x_{n+1} = 1 - \lambda x_n^2 \quad (7.45)$$

为例, δ_m 的变化可示如表 7.2。

表 7—2 费根保姆数在映射 $x_{n+1} = 1 - \lambda x_n^2$ 中的出现

m (轨道周期)	分叉点	$\lambda_m - \lambda_{m-1}$	$\delta_m = \frac{\lambda_m - \lambda_{m-1}}{\lambda_{m+1} - \lambda_m}$
0	0.75		
1	1.25	0.5	4.233 738 275
2	1.368 098 939 4	0.118 098 939 4	4.551 506 949
3	1.394 046 156 6	0.025 947 217 2	4.645 807 493
4	1.399 631 238 4	0.005 585 082 3	4.663 938 185
5	1.400 828 742 4	0.001 197 503 5	4.668 103 672
.....			
.....			
∞ (非周期行为)	7.401 155 2...		4.669...

尼科里斯 G 等. 探索复杂性. 成都: 四川教育出版社, 1986. 144

3. 阵发混沌道路

这是由玻缪(Yves Pomeau, 1942—)与曼尼维尔(Paul Manneville, 1946—)提出的通向混沌的道路。阵发混沌与倍周期分叉是孪生现象,凡是能观察到倍周期分叉的系统,原则上都应有阵发混沌。可以用迭代映象为阵发混沌建立一种模型。作为一维离散系统的一例,我们再看罗辑斯蒂映象。在式(7.40)中,以 $n+1$ 代替 n ,得

$$x_{n+2} = \alpha x_{n+1} (1 - x_{n+1}) \quad (7.46)$$

然后,按式(7.40),以 x_n 取代 x_{n+1} ,得

$$x_{n+2} = \alpha^2 x_n (1 - x_n) (1 - \alpha x_n (1 - x_n)) \quad (7.47)$$

因式(7.40)所示的映象用了两次,可将式(7.47)简记为

$$x_{n+2} = f^{(2)}(x_n) \quad (7.48)$$

在式(7.48)中再以 $n+1$ 代替 n ,并利用式(7.40),则有

$$x_{n+3} = f^{(3)}(x_n) \quad (7.49)$$

对于控制参量 α 的某一特定值,映象(7.49)可示如图 7—69,其中方框处的形象可放大为图 7—70。由图 7—69 可知, $f^3(x)$ 的曲

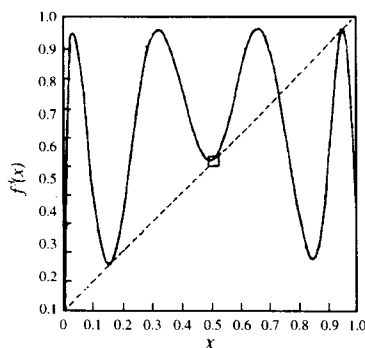


图 7—69 映象 $f^3(x) \equiv f^{(3)}(x)$
(对于一个特定参量值) Haken H. Syner-
getics. Berlin; Springer-Verlag, 1983, 348

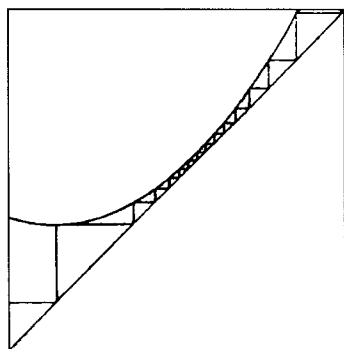


图 7—70 阵发混沌发生机制
同图 7—69

线与 45° 分角线之间有三处狭窄的“隧道”。当迭代中一个点落在某个“隧道”附近时,就发生图 7—70 所示的过程。点 x_n 在隧道中迭代多次后,最终从另一端离去,并随之进行一些大幅跳跃,这就意味着发生了混沌运动。经过一些时间后,点 x_n 又可能来到这个或另一个隧道附近,再次重复以上过程,然而每次都不是准确地重蹈旧辙。这样,隧道中的迭代很像是在不动点附近踏步,对应于“层流”或近乎周期的运动。不同隧道之间的跳跃,对应于“湍流”。这就说明,为什么整个迭代过程看起来就像是周期运动中随机地夹杂了一些混沌阶段,“层流”时而被阵发的“湍流”打断。隧道越狭窄,“层流”时间即通过隧道所需时间也越长。当峰或谷与分角线相接触时,层流时间趋向无穷大,即达到完全的周期状态。这个过程倒过来看,“层流”时间随着谷或峰偏离分角线而愈来愈短,终于完全成为“湍流”状态。这就是从有序(周期运动)到混沌的阵发道路。可见,阵发混沌表现为系统的时间行为忽而周期,忽而混沌,随机地在两者之间跳跃。

以上,我们简要地考察了三种通向混沌的道路。人们已发现还存在着其他的道路。可见,就系统进化的某一特定阶段而言,趋向混沌的道路是曲折的,但目标是十分明确的;通向混沌的道路是多样的,但目标是能够达到的。在系统层内进化中,系统状态都不能绕过混沌。

二、 $E \rightarrow Q \rightarrow A \rightarrow C$

如已所述,系统从简单到复杂的进化可表示为从简单结构到复杂结构的进化。但是,这一结论过于抽象,我们应当具体地阐明系统在层内进化中究竟经历哪些结构。日本学者泽富彦曾在“非平衡下的经济规律”(1986 年)^①一文中作了富有启发的研究。这些年来我在广泛领域探讨系统层内进化过程各阶段的结构特性,取得了一些新结果。

如果设定决定系统结构特性的因素为封闭—开放、平衡—非平

^① 沢富彦,非平衡下の経済法則,数理科学(日),1986,(7)

衡、线性—非线性这三对因素,就可将系统空间分为八个区域,如图 7—71 所示。

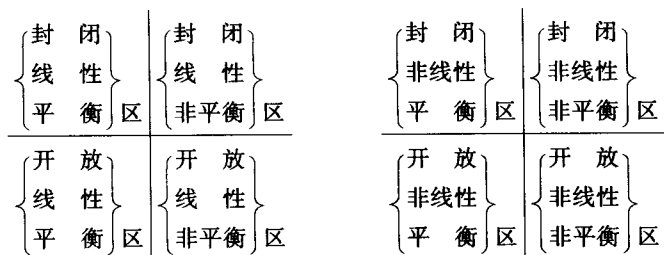


图 7—71 八个系统空间区域

在这八个区域中,能形成稳定有序结构的只有四个区域,即封闭—线性—平衡区、开放—线性—非平衡区、开放—非线性—非平衡区、封闭—非线性—非平衡区,其中所能形成的稳定有序结构分别是平衡有序结构(E)、准平衡有序结构(Q)、活性结构(A)、混沌结构(C),如图 7—72 所示。

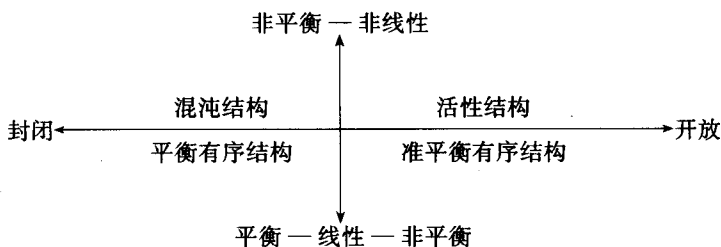


图 7—72 四种有序结构

图 7—72 所示的简化模型中若干问题尚需认真讨论。

首先,在封闭—线性—平衡区,所能生成的是平衡有序结构。这是一种“死”的结构。在开放—非线性—非平衡区,所能生成的是活性结构。这是一种“活”的结构。物理系统中出现的耗散结构被视为特殊的活性结构。上面已讨论过这两种情况,对此似乎无所异义。

其次,在开放—线性—非平衡区,所生成的准平衡有序结构基本上是与平衡有序结构一致的,但是由于开放性的驱使,准平衡有序结构保持着与平衡有序结构的一定距离。例如在图 7—73 中,由于涨落,系统随时可以偏离这个定态而达到非定态 2。根据最小熵产生原理,非定态 2 的熵产生大于定态 1 的熵产生,系统进化的趋向是返回到与最小熵产生相对应的定态 1。但是,适当的外界作用还是可以使系统“长久地”维持准平衡有序结构。

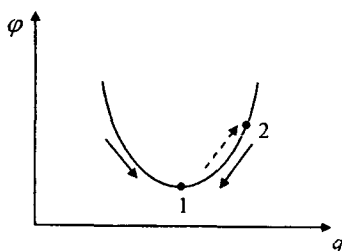


图 7—73 最小熵产生原理及
稳定性示意

q 代表某个状态变量,虚线代表
涨落引起的变化

第三,就混沌结构的生成而言,

问题似乎更复杂。严格地说,混沌结构既可出现在保守系统中,亦可出现在耗散系统中。因此,混沌结构的可生成区域不应只是封闭—非线性—非平衡区,而还应包括开放—非线性—非平衡区。在这里之所以把混沌结构的可生成区域说成是封闭—非线性—非平衡区,是基于:其一,混沌结构与活性结构是不同类型的结构;其二,开放与封闭是相对的概念,任何现实系统都既有封闭性又有开放性,只是其程度或所涉及的范围不同;其三,混沌结构通常出现在活性结构(如耗散结构)之后,当活性结构的开放机制受阻而某种封闭性起作用时,活性结构就转化为混沌结构。例如,在耗散结构中,系统可以自由地充分地排除系统内部的多余熵,但是如果这一排除机制受阻,即封闭性起作用,那么由于多余的熵滞留在系统中,耗散结构被破坏,随之出现混沌结构。

例如,在图 7—10 所示的贝纳德花纹的生成过程中,当流体尚未被加热时,其结构是平衡有序结构;当 ΔT 很小时,其结构是准平衡有序结构;当 $\Delta T > \Delta T_c$ 时,其结构是耗散结构;当 $\Delta T > \Delta T_c$ 时,因其散热机制受阻,或者说,因其散热过程来不及排除多余的熵,最终出

现混沌结构。不难看出,这时,混沌结构是出现在开放—非线性—非平衡区中的,但是之所以生成有别于六角形花纹的混沌结构,是因为封闭性在起作用。

因此,在理解图 7—72 所示的简化模型时,我们不能拘泥于“区域”概念。我们所要重视的是封闭—开放、线性—非线性、平衡—非平衡这三对因素的交互作用。在特定情况下,对于特定的变量及其相互关系应赋予特定的封闭或开放、线性或非线性、平衡或非平衡的意义。并且,对于在特定系统中出现的各种有序结构应赋予特定的平衡有序结构、准平衡有序结构、活性结构或混沌结构的含义。例如,在图 7—74 中,流体绕过圆柱流动。在低速时,可视为处于封

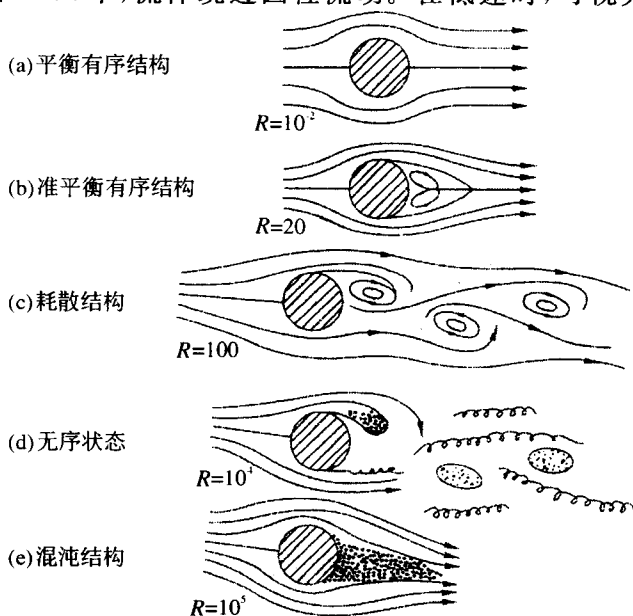


图 7—74 流体以不同流速绕过
圆柱时形成的不同系统结构

Haken H. *Synergetics*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 6

闭—线性—平衡区,所出现的层流可视为平衡有序结构(a)。在流速较高时,有“额外”的流体流入,可视为处于开放—线性—非平衡区,所出现的静态模式可视为准平衡有序结构(b)。继续增加流体速度,就出现动态图样,可视为在开放—非线性—非平衡因素作用下生成的活性结构(c)。最后,再增加流速时,流体的流出受阻,可视为处在封闭—非线性—非平衡区,所生成的湍流可视为混沌结构(e)。这里之所以不考虑(d)的情况,是因为在这种情况下并不出现某种有序结构。类似的考虑完全适用于解释图 7—11 所示的泰勒不稳定性序列,其中也可观察到平衡有序结构(a)、准平衡有序结构(b)、活性结构(c)、混沌结构(d)。

从以上的讨论已能看出(但还要强调的是),上述的四种有序结构排成一个序列:大量复杂系统在层内进化过程中,在封闭—开放、线性—非线性、平衡—非平衡这三对因素的交互作用下,依次经历平衡有序结构→准平衡有序结构→活性结构→混沌结构这四个阶段,简记为 $E \rightarrow Q \rightarrow A \rightarrow C$ 。

7.5.3 系统进化的周期性

人们在自己的观察中,在自己的日常生活中,在信仰和研究中,或基于不同的事实,或基于不同的感悟,或基于不同的思虑,发现了世界的周期性。如四季轮回,日出日落,月亮圆缺;如秋千来回,荡船摆动,车轮转动。在物理学中,简单系统模型揭示了物体运动状态(如位置、速度、加速度等)的周而复始,并用时间表示运动周期。但是,在佛教轮回观念中,众生有如车轮旋转,各依所作善恶业因,永远在六道(天道、人道、阿修罗道、地狱道、饿鬼道、畜生道)中循环转化,故称之为六道轮回;轮回时间长短并不重要,重要的是轮回中所发生结构的异同。

在系统进化中,尤其在复杂系统进化中,重要的也是循环结构的

特性,而不是循环时间的长短。现将 7.5.1 和 7.5.2 的讨论内容概括如下:大量的复杂系统在封闭—开放、线性—非线性、平衡—非平衡这三对因素的交互作用下依次形成平衡有序结构→准平衡有序结构→活性结构→混沌结构。由于在一切层内进化过程中反复出现这样的结构变换,由层间进化和层内进化构成的总的系统进化过程就形成一个周期性循环过程。这就是在大量复杂系统进化过程中起作用的系统进化的周期规律。可将这一规律表示为图 7—75 与图 7—76。

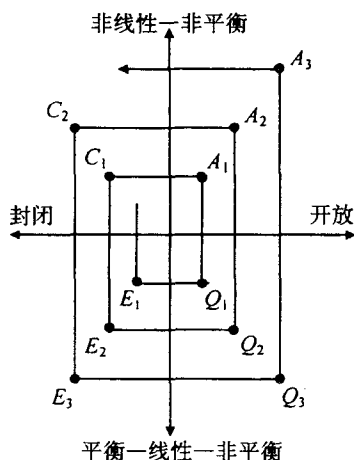


图 7—75 系统进化的周期性

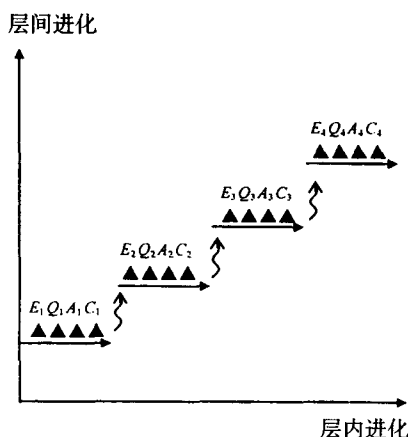


图 7—76 层内进化与层间进化

一、系统波

根据系统进化的周期规律,系统进化过程形成一个波,可称为系统进化波,或简称为系统波。可将系统波的若干特征简述如下:

(1) 一般来讲,系统波不是在一个系统层次上形成的波,系统波的形成依赖于层间进化与层内进化,而且即使在层内进化中 E 、 Q 、 A 、 C 不在一个平面上,因此系统进化过程是一个螺旋式上升过程。

(2) 在不同的进化层次上重演着 $E \rightarrow Q \rightarrow A \rightarrow C$ 的转变,但是在

不同层次上 E 、 Q 、 A 、 C 都有自己的特征,因此,

$$\left. \begin{array}{l} E_1 \neq E_2 \neq \cdots \neq E_n \\ Q_1 \neq Q_2 \neq \cdots \neq Q_n \\ A_1 \neq A_2 \neq \cdots \neq A_n \\ C_1 \neq C_2 \neq \cdots \neq C_n \end{array} \right\} \quad (7.50)$$

这就告诉我们不仅要把握不同层次上的四种有序结构的类似性,而且要把握这四种有序结构在不同层次上的质的区别。

(3) 有些系统的系统波只有一个周期,它们在经历了一次 $E \rightarrow Q \rightarrow A \rightarrow C$ 的转变之后就瓦解;在有些系统中,层内进化过程分成许多子过程,而每个子过程又分成由 E 、 Q 、 A 、 C 这四种结构表征的四个阶段,因此就这些系统而言,不仅其总的层内进化过程而且其各子过程都表现为 $E \rightarrow Q \rightarrow A \rightarrow C$ 的依次更替。

(4) 有些系统波是可以定量地加以描述的,但是有些系统波只能以定性方式加以描述。我在这里所考察的系统波主要是着眼于系统进化中出现的各种有序结构的质的侧面,而不是量的侧面。

(5) 特别引人注目的是,系统从一个层次到另一个层次的转变总是要通过混沌阶段。因此,混沌阶段是结束一个旧层次、迎来一个新层次的革命性的转变阶段,正如在社会系统进化中,混沌阶段相当于社会全面危机和革命转变时期。

二、若干实例:经济波、政治波、科学波

我们在上面讨论封闭—开放、线性—非线性、平衡—非平衡因素并规定平衡有序结构、准平衡有序结构、活性结构、混沌结构时,是以物理系统为背景的。但是,从中得出的一般原理不仅适用于大量物理系统,而且适用于大量的非物理系统,如社会经济系统、政治系统和文化系统。为了用系统进化的周期规律来讨论非物理系统,需要把这些系统概念具体化,为它们赋予各种具体系统中的具体意义。在下面的实例分析中,我们将试作这种具体化。

1. 经济系统

为了用系统进化的周期规律分析经济系统,需要把封闭—开放、线性—非线性、平衡—非平衡这三对概念具体化,给它们赋予经济意义。

经济系统的封闭与开放:任何经济系统,作为系统都是开放的,因为原料的输入和产品的输出是经济系统赖以运行的一个必要条件(更具体的考察,请参看本书 6.3)。但是,作为经济系统,却可能是封闭的或开放的。如果一个经济系统对于其他经济系统是开放的,就称为开放的经济系统,否则就是封闭的经济系统。更具体地说,一个经济系统的开放与封闭,应该从它与市场的关系上考察。一个经济系统如果与市场相隔绝,就是封闭的经济系统,否则就是开放的经济系统;一国经济如果与国际市场相隔绝,就是封闭的国家经济,否则就是开放的国家经济。

经济系统的线性与非线性:任何经济系统,作为系统都是非线性的,但作为经济系统却可能是线性的或非线性的。在经济系统中,生产与消费、生产的增长与消费的增长之间的关系不是线性的就是非线性的,同时,各部门生产及其增长之间的线性或非线性关系也必须加以考虑。非线性关系在一定阈限之内是经济系统迅速发展的推动力,而在一定阈值之外它又是使经济系统有序结构发生转变的触发因子。

经济系统的平衡与非平衡:任何经济系统,作为系统都是非平衡的,但作为经济系统却可能是平衡的或非平衡的。说一个经济系统处于平衡,是指系统内的商品流通阻力是均匀的,当存在着流通阻力不同的许多商品流时,就说该经济系统处于非平衡。一定程度的非平衡是经济系统迅速生长的必要条件,但是当超过一定阈限时非平衡就会从既有经济系统发展的推动力转化为破坏力,有可能转化为经济系统结构转变的推进力。

现在,我们可以考察经济系统的周期发展过程。在这里,我们所要考察的是经济主波、经济长波、经济超长波以及经济总波。

(1) 经济主波的内在结构

资本主义社会的经济波亦称经济循环,通常分为以 3—4 年(平均约 40 个月)为一个周期的经济短波〔基钦(Joseph Kitchin)循环〕、以 14—20 年(平均约 20 年)为一个周期的经济中波〔库兹涅茨(Simon Smith Kuznets, 1901—1985)循环〕、以 40—70 年(平均约 50 年)为一个周期的经济长波〔康德拉季耶夫(Nikolai Dmitrievich Kondratiev, 1892—1938)循环〕,以及以 7—12 年(平均约 10 年)为一个周期的经济主波〔朱格拉(Joséph Clément Juglar, 1819—1905)循环〕^①。经济波通常分为四个阶段,即高涨(繁荣)阶段、危机阶段、萧条(停滞)阶段和复苏阶段。这四个阶段的系统有序结构正好分别为活性结构、混沌结构、平衡有序结构和准平衡有序结构。这四个阶段的形成条件可用图 7—77 表示。现以经济主波为例,看经济波各阶段的一般特征。

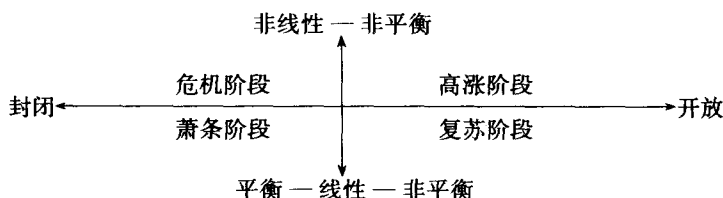


图 7—77 资本主义再生产周期的四个阶段

高涨阶段:在这个阶段,生产迅速扩张,工人就业机会增多,工资也提高,物价上涨,商人尽量购进商品,银行家乐于向工业家和商人提供贷款。虽然整个社会的消费会普遍提高,但生产的扩张远远超出消费的扩张;同时,商品流通中的不平衡也日趋加剧。生产的高涨导致生产过剩,而生产过剩以自催化方式扩张。当生产过剩达到某个阈限时,经济危机就爆发了。

① 姜哲圭等. 现代经济学. 汉城:博英社,1993. 248—253

危机阶段:危机阶段与高涨阶段一样,也处于非线性非平衡状态。但是从高涨阶段到危机阶段的转变,是从开放结构向封闭结构的转化。商品销路突然缩小,价格暴跌;生产急剧下降,中小企业破产,大企业缩减生产;工人失业猛增,工资下降;支付手段奇缺,交易所纷纷倒闭。不难看出,在从高涨阶段向危机阶段的转变中起关键作用的是系统的封闭性。

萧条阶段:萧条阶段与危机阶段一样,都是在封闭情况下发生的。但是从危机阶段到萧条阶段的转变,是从非线性—非平衡结构到线性—平衡结构的转化;为摆脱经济危机所作的各种努力的积极作用和消极作用都来自其消除系统内部的非线性—非平衡因素,结果混沌结构的内在不稳定性随之消失,但系统的结构从动态结构转化为静态结构,从“活”的结构转化为“死”的结构。生产水平处于停滞状态,商业萎缩,物价低落,大量失业工人仍然找不到工作。堆积的存货部分销毁,部分削价销售。

复苏阶段:复苏阶段与萧条阶段一样,都是线性结构,但是从萧条阶段到复苏阶段的转变是从封闭—平衡结构到开放—非平衡结构的转化。随着存货不断减少,以及采用新技术新设备,经济得到恢复;生产有所扩大,物价有所上涨,利润逐渐增加,失业工人逐渐减少,社会购买力逐渐增长,而市场的扩大又反馈到生产上去。这是一个发散性正反馈过程,随着系统内非平衡关系的加强和非线性因素的产生,资本主义经济周期就重新进入高涨阶段,开始新的循环。

资本主义经济循环过程,就是这样循着高涨→危机→萧条→复苏→高涨的阶段运动的。在整个过程中,虽然国家和资本家个人、集团不断以“主观意志”影响(甚至支配)各个阶段,但从较长的时间跨度上看资本主义再生产过程是一个不以任何个人或集团的意志为转移的自然发生的自组织过程。在整个过程中,不断发生 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow Q \rightarrow A'$ 的转化,而这种转变我们可以用封闭—开放、线性—非线性、

平衡—非平衡这几个因素的交互作用来加以解释。

以上的考虑大致上也适用于分析经济短波、经济中波和经济长波。当然,在每一种场合,需要根据具体情况进行具体分析。此外,人们曾经对社会主义经济循环持否定态度。但是,在我看来,社会主义社会的经济过程也是在封闭—开放、线性—非线性、平衡—非平衡因素的交互作用下,依次经历 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow Q \rightarrow A'$ 的发展阶段,即依次经历高涨→危机→萧条→复苏→高涨的发展阶段。虽然有时候国家强有力的干预会造成社会主义经济有可能避免其中某个阶段(如 C,即危机)的假象,但是不论苏联或东欧的社会主义经济过程,还是中国的经济发展过程,都表明社会主义经济也不能越过其中任何一个阶段,只是其表现有所不同。中国实行改革开放政策以来的经济现实也为此提供支持^①。

(2) 经济长波的内在结构

在经济波研究中,经济长波也非常重要。最早是由荷兰学者冯·黑尔德伦和沃尔夫分别在 1913 年和 1924 年提出过资本主义的发展存在长波的思想。但是经济长波论的真正奠基人是俄罗斯经济学家康德拉季耶夫。他对 18 世纪 80 年代以后约 140 年间英、法、德、美四国的价格、资本利息、多种商品生产和消费的平均水平、工资水平和许多其他经济指标进行统计分析,发现三个长周期,每个周期约为 40—60 年。第一次为从 18 世纪最后十多年到 19 世纪中期,第二次在 19 世纪后半期,第三次从 19 世纪末到 20 世纪 50 年代。这三次周期的波峰分

① 1996 年在上海召开的“东亚经济合作国际研讨会”上,上海市政府计委研究所社会经济室主任余惕君发表了“中国新一轮经济周期及发展展望”一文。文中指出:中国经济的周期波动,从 1953—1996 年共经历了 9 个周期。每个周期 4—6 年,平均约 5 年。第 1 周期:1953—1957 年,历时 5 年;第 2 周期:1958—1962 年,历时 5 年;第 3 周期:1963—1968 年,历时 6 年;第 4 周期:1969—1972 年,历时 4 年;第 5 周期:1973—1976 年,历时 4 年;第 6 周期:1977—1981 年,历时 5 年;第 7 周期:1982—1986 年,历时 5 年;第 8 周期:1987—1990 年,历时 4 年;第 9 周期:1991—1996 年,历时 6 年。

别在 1814 年、1873 年和 1914—1920 年。康德拉季耶夫所发现的这种长周期现在被称为康德拉季耶夫周期或康德拉季耶夫波。从 1787 年算起的几次经济长波及其各阶段如表 7.3 所示。

表 7.3 世界经济长波

阶段 周期	繁荣阶段	危机阶段	萧条阶段	复苏阶段
周期 I	1787—1800	1801—1813	1814—1827	1828—1842
周期 II	1843—1857	1858—1869	1870—1885	1886—1897
周期 III	1898—1911	1912—1925	1926—1939	1940—1952
周期 IV	1953—1965			

关于经济长波的起因问题,经济学家们仍然众说纷纭。康德拉季耶夫认为,需要很长时间和大量费用才能生产的固定资产,首先是固定资产的被动部分(工厂、基础设施等)的损耗、更换和扩大是长周期的基础。经济学家熊彼特(Joseph Alois Schumpeter, 1883—1950)等大多数长波论者认为技术和工艺创新的波浪式运动是经济长波的主要原因。斯·尼基京等人试图从科技进步对需求的影响中寻找经济长波的起因,而尤·希什科夫等人则认为长波的起因不应到技术和工艺中去寻找,而应到生产的社会经济条件中去寻找。

这几种观点都有合理之处,但是单个地讲,都不足以圆满地揭示经济长波的起因。经济长波的起因应该到各种经济因素之间以及各种经济因素与其他影响因素之间的交互作用中去寻找,应该到经济系统的开放—封闭、平衡—非平衡、线性—非线性作用的交互关系中去寻找。在经济波中,上升和下降决不是经济指标的单纯的量的运动,而是既有量的周期性波动,又有质的周期性波动。按照系统的周期发展规律,经济系统在它的进化过程中依次经历 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow Q$ 这四个阶段,而这四个阶段作为一个周期反复出现。在所选取的不同

时间尺度上,分别表现为经济主波、经济短波、经济中波和经济长波(以及经济超长波、经济总波),而每一种波都有其结构特征。在经济波中,决定经济系统的高速增长和繁荣的是开放—非线性—非平衡因素;随后产生的急剧衰退是由于封闭—非线性—非平衡因素的作用;然后出现经济停止不前的局面,起作用的是封闭—线性—平衡因素;最后,当起作用的是开放—非平衡—线性因素时,就出现经济缓慢增长的势头。这样,系统完成一个运动周期,接着又开始下一个周期。

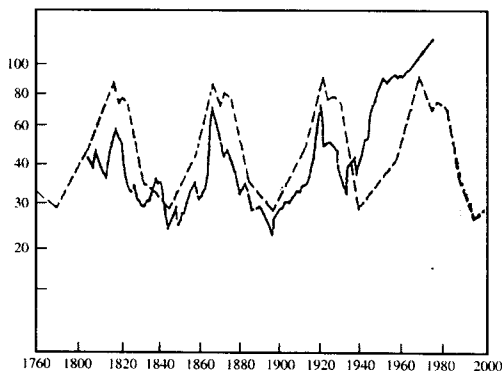


图 7—78 从美国批发价格看美国经济长波

注:实线表示批发价格指数(1967 年为 100);虚线表示“理想化”的长周期。阿·伊久莫夫,对经济长波论的批评性分析,世界经济译丛,1988(9)

康德拉季耶夫在宏观尺度上,以经验事实为根据,发现经济长波,完成了历史性的勋业。当我们分析经济长波的内

在结构时,例如在图 7—78 中,波形的急剧上升—急剧下降—缓慢下降—缓慢上升—急剧上升的周期可以看作是美国经济系统的 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow Q \rightarrow A'$ 的周期性运动在批发价格指数方面的表现。

(3) 经济超长波的内在结构

这里所说的经济超长波是指跨越若干个历史时代的经济波,或在一个相当长的历史时代发挥作用的经济波现象。这方面至今没有多少研究成果,我所看到的惟一的一项研究是日本人涩富彦的工作。

涩富彦根据历史资料分析了日本经济系统有序结构的历史发展,发现了我们在这里所说的经济超长波。他认为:日本历史以飞鸟

时代为组织化的开创期,已经经历两个周期,每个周期包含四个历史时代,分别对应于 A、C、E 与 Q,如表 7.4 所示(表中,我已根据自己的概念体系改变了沢富彦所使用过的各种结构的名称)。从经济上看,这四种结构的特征如下。

表 7.4 日本各经济时代结构性质

	历史时代	起至年度	持续年数	结构类型
第一循环	飞鸟时代	592—710	118 年	活性结构
	奈良时代	710—794	84 年	混沌结构
	平安时代	794—1192	440 年	平衡结构
	镰仓时代	1192—1393	200 年	准平衡结构
第二循环	室町时代	1393—1568	175 年	活性结构
	战国时代	1568—1598	30 年	混沌结构
	德川时代	1598—1859	260 年	平衡结构
	明治、昭和	1859—1974	115 年	准平衡结构

沢富彦, 非平衡下の経済法則, 数理科学(日)1986(7)

平衡有序结构:这是最有序的状态,其特征是只实行俭约令。平安时代发布二次俭约令,德川时代发布 18 次俭约令。

准平衡有序结构:其特征是德政(债务豁免令)和俭约令的并用。镰仓时代实行二次德政、二次俭约令,明治、昭和时代实行一次德政、三次俭约令。

活性结构:其特征是只实行德政。飞鸟时代与室町时代分别有三次和 20 次只实行德政。

混沌结构:这是“无序”的状态,其特征是德政与自由化政策的并用,出现下克上的局面。奈良时代与战国时代均为下克上的时代。

沢富彦还认为,日本经济以 1974 年为临界点,从准平衡结构转向活性结构。1974 年以后,日本已实行二次(1976 年与 1982 年各一次)所得税特别减税政策,这显然属于德政,而只实行德政是活性结

构经济形式的特有现象。

沉富彦对日本各历史时代经济结构的分类与分析是否妥当,尚需进一步研究。但是可以肯定,这种研究方式是有意义的。或者说,系统进化的周期规律将适用于各国经济结构演变史的研究,适用于整个人类历史发展过程的研究。

(4) 经济总波的内在结构

这里所说的“经济总波”一词表示人类迄今为止的以及今后几百年的经济过程。这并不是一个严格的科学概念,只能看作是一个方便的说法。重要的是,人类社会迄今为止的发展能否分成几个有意义的有序结构。这里,我用系统进化的周期规律和经济系统的熵增加原理(见本书 6.3)来进行讨论。

经济过程的熵增加原理不仅适用于简单再生产过程,而且适用于扩大再生产过程。所谓经济增长,是指经济过程从简单再生产发展到扩大再生产,从而使经济规模有所扩大。显然,随着经济增长,熵增加过程就要被加速。经济增长有快有慢,而熵增加也有快有慢。因此,经济增长与熵增加之间有下列四种关系,见图 7—79:(a)经济增长慢,熵增加慢;(b)经济增长快,熵增加快;(c)经济增长慢,熵增加快;(d)经济增长快,熵增加慢。

经济增长	快	快/慢 (d)	快/快 (b)
	慢	慢/慢 (a)	慢/快 (c)
		慢	快
		熵 增 加	

在这四种情形中,前三种情形可在人类历史中找到其原型,但是最后一种情况则未曾有过。

图 7—79 经济增长与熵增加

人类能否找到“经济增长快,熵增加慢”的经济增长模式,尚难断定。在此,我将较仔细地考察人类已经、正在和将要经历的实际过程中经济增长与熵增加之间的关系。

人类的历史可以追溯到 300 万年以前。从那时候到未来几百年

期间的人类社会经济过程可分为下列四个阶段^①：

(i) 经济增长极为缓慢,熵增加也极为缓慢。这时,人类处在狩猎—采集社会。人类所需的主要生活资料不是人类劳动的产物,而是地球上自然过程(如光合作用、动物繁殖活动等)的产物。人类为生存而付出的劳动主要是将现成的食物资源取为己有。当时,人类在劳动和其他活动中只使用取自食物的体能,人均每日耗能量只有约 2kcal。因此,经济过程中的熵增加极少。这个阶段可用万年计量,历时达几万年至几百万年。

(ii) 经济增长有所加快,熵增加也开始加快。这时,人类处在农业社会。人类开始以各种方式改变自然界,并创造出所谓人造自然界,从中获取生活资料和生产资料。但是在农业中,使用价值的增值主要不是发生在劳动过程(如耕地、播种、施肥、灌溉、收割、脱谷等)中,而是发生在自然过程(如种子的发芽、农作物的生长与开花结果等)中。经济活动的基本能源取自畜力与人力,人均每日耗能量达 12000kcal。经济增长与熵增加还不快。这个阶段可用千年计量,历时约 10000 年。

(iii) 经济增长快,熵增加也快。这时,人类处在工业社会。在狩猎—采集社会和农业社会中,经济过程的主要物质基础是可再生资源,而在工业社会中经济过程的主要物质基础转变为非再生资源,例如从各种矿物资源中获取工业原料,从煤炭、石油和核能中获取动力。由于在短时间内加速消耗地球在几十万年至几十亿年漫长时间里积累下来的自然资源,经济以以往任何历史时代都不可比拟的速度快速发展,经济的快速增长伴随着物熵和热熵的快速增加。这可以从能耗中看出。1850 年至 1870 年间,英、德、美三国人均每日耗能量已达到 70000kcal,而 1890 年后随着电力的广泛使用,这个过程又

^① 这里所引用的各时期耗能量,参看:Miller J G, Miller J L. *The Earth as a System, Behavioral Science*, 1982. 27(4):303—322

在加速,到了 1970 年美国人均每日耗能量达到 230000kcal。这个阶段可用百年计量,估计将历时约 1000 年。

在工业社会中,又一个值得重视的问题是废物问题。在图 6—7 所示的从资源到废物废热的流中,废物可分为两种。一是可转化为资源的废物,称为良性废物,另一是不能转化为资源的废物,称为恶性废物。在工业社会之前,所产生的废物基本上都是良性废物,但工业社会却造出了大量恶性废物。这些恶性废物像人体内的恶性肿瘤一样,正在威胁着工业社会的生存。

(iv) 经济停止增长或出现负增长,但熵增加继续加快。这时,人类将处在所谓后工业社会^①。其经济运营的主要物质基础仍然是非再生资源。但是,资源品位低劣,含熵量很大;环境污染严重,废物废热的排放严重受阻;经济过程中的熵产生量又剧增。结果是经济出现零(负)增长,人类的生存遭到威胁,人口大量减少。人类社会尚未进入这个阶段,但是正朝着这个阶段挺进。

这样,我们就可以发现人类社会发展的经济总波也分成系统进化的周期规律所指出的四个稳定有序结构阶段即 E、Q、A、C。在适当规定有关变量及其特性后,可以把狩猎—采集社会→农业社会→工业社会→后工业社会的演进过程看作是平衡有序结构→准平衡有序结构→活性结构→混沌结构的演进过程,如图 7—80 所示。

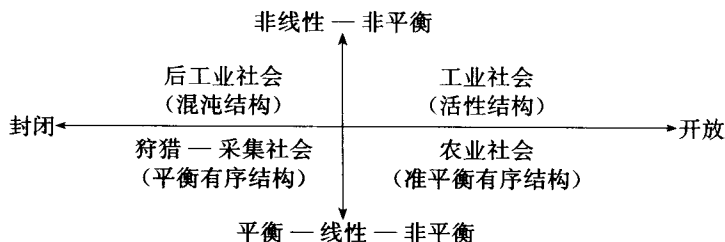


图 7—80 人类社会演进的四个阶段

① 这里,我借用未来学家或社会学家所使用的“后工业社会”一词,但其含义却完全不同。

一般来讲,一个复杂系统在演进到混沌结构后,有两种前途,一是趋于崩溃,另一是演进到高一层次(或下一子过程)的平衡有序结构。同样,人类社会在演进到后工业社会(混沌结构)后,也将面临两种命运,或者趋于全面崩溃,走向灭亡,或者通过适当的内外调节过程,进入以可再生资源为主要物质基础的新的平衡有序结构阶段。

2. 政治系统

令人惊奇的是通常被认为随意性很大的政治系统的发展也呈现长波现象。美国华盛顿大学国际问题地区研究所所长莫德爾斯基(George Modelski)系统地阐述了世界政治系统发展的长波模式^①。根据他的观点,每个长波即每个长周期都分成四个阶段:“全球战争”阶段、“世界大国”阶段、“非正统化”阶段、“分散化”阶段。世界战争导致世界大国出现,而世界大国出现之后,又总会出现它的竞争者与之抗衡。长波周期大约为 100 年。他用这种观点考察并预测了自 1494 年至 2030 年的世界政治长波。

我惊奇地看到,莫德爾斯基所说的政治长波每个周期的四个阶段正好与我所说的系统周期发展的四个阶段相对应,即“全球战争”阶段对应于混沌结构阶段,“世界大国”阶段对应于平衡有序结构阶段,“非正统化”阶段对应于准平衡结构阶段,而“分散化”阶段对应于活性结构阶段。在对莫德爾斯基的用语稍作修正之后,根据他所提供的资料就可画出表 7.5。同时,可将这四个阶段的生成条件表示为图 7—81。

① 莫德爾斯基 G. 二十一世纪初的世界政治格局,世界经济译丛,1986(10)。另见:Wallerstein I. *The Modern World System*. New York: Academic Press, 1974; Wallerstein I. Three Instances of Hegemony of the World Economy. *International Journal of Comparative Sociology*, 1983. (24): 100—108; Modelski G. The Long Cycle of Global Politics and the Nation-State. *Comparative Studies in Society and History*, 1978. (4): 214—235; Gilpin R. *War and Change in World Politics*. Cambridge University Press, 1981

表 7.5 世界政治系统的长波及其内在结构

周 期	结构	混沌结构			平衡有序结构			准平衡结构			活性结构		
	阶段	“全球冲突”阶段			“世界大国”阶段			“非正统化”阶段			“多极化”阶段		
	关 联 事 项	主 要 冲 突	起 止 年 度	持 续 年 数	世 界 大 国	起 止 年 度	持 续 年 数	新 兴 国 家	起 止 年 度	持 续 年 数	挑 战 国	起 止 年 度	持 续 年 数
葡 萄 牙 周 期	意大利及印度洋战争	1494—1516	22	葡萄牙	1516—1539	23		1540—1560	20	西班牙	1560—1580	20	
荷 兰 周 期	西班牙—荷兰战争	1580—1609	29	荷兰	1609—1639	30		1640—1660	20	法国	1660—1688	28	
第 一 次 英 国 周 期	路易十四世的战争	1688—1713	25	英国	1714—1739	25		1740—1763	23	法国	1764—1792	28	
第 二 次 英 国 周 期	法国革命战争—拿破仑战争	1792—1815	23	英国	1815—1849	34		1850—1873	23	德国	1874—1914	40	
美 国 周 期	第一、二次世界大战	1914—1945	31	美国	1945—1973	28		1973—2000	27	苏联	2000—2030	30	

据莫德尔斯基的论文内容制作,见:二十一世纪初的世界政治格局. 世界经济译丛, 1986 (10)

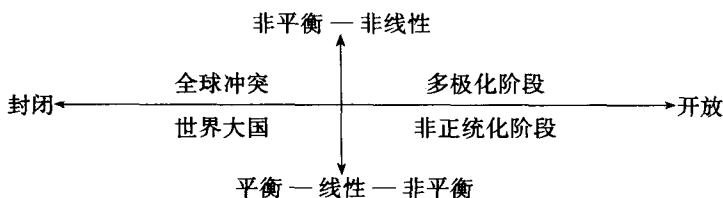


图 7—81 世界政治长波四个阶段

世界政治长波各阶段的系统状态特征可简述如下。

“全球冲突”阶段:这是充满混乱与冲突的“无序”状态。在过去的历史中,“全球冲突”都表现为“全球战争”。挑战国通常是新兴国家中的主要强国。

“世界大国”阶段:这是世界政治系统最有序的状态。这时候的世界是单极世界。“整个世界”处于一个“世界大国”的控制之下,而“世界大国”通常靠强权维持世界秩序。

“非正统化”阶段:这是“世界大国”仍在实行强权政治,但又出现一些新兴国家,从而使“世界大国”的领导权开始衰退的阶段。在“世界大国”和新兴力量之间控制与反控制、霸权与反霸权的斗争渐趋严重。

“多极化”阶段:这是世界政治系统内部最活跃的阶段。世界政治系统由单极系统变成多极(两极、三极或更多极)系统。多极力量之间有冲突又有协同,整个世界政治系统能维持其动态稳定秩序。当这种稳定被破坏的时候,世界政治体系就从“多极化”阶段转入“全球冲突”阶段,开始新的周期。

上面已经谈到,在历史上“全球冲突”都表现为“全球战争”。但是我们不能由此断定,“全球战争”是“全球冲突”的惟一形式。如何使世界政治系统从“多极化”阶段过渡到另一种形式的“全球冲突”,从而避免“全球战争”,乃是摆在政治家们面前的一个重大理论和实践问题。

又一个问题,是苏联于 1991 年解体之后,俄罗斯已丧失了表 7.5 中“多极化”阶段挑战国的地位。现在有三种观点值得考虑。其一,是认为世界政治系统已进入第二个美国周期,21 世纪将仍然是美国世纪;其二,是认为目前的世界仍然处在美国周期的“多极化”阶段,中国(也许还有欧盟)正在成为美国的主要挑战国,中美之间的较量将决定 21 世纪的“主角”;其三,是认为中国的崛起势不可挡,21 世纪将是中国世纪。谁是谁非,尚须认真研究,将由历史给出答案。

在政治系统波的研究中,除了世界政治长波内在结构的研究之外,对一国政治系统波内在结构的研究也是一个极为重要的课题。我相信,系统进化的周期规律将有助于推进这方面的研究工作。

3. 科学系统

库恩关于科学革命结构的理论是本世纪科学史和科学学研究中最优秀的成果之一^①。他认为,科学是在常规科学→反常与科学发现的涌现→危机与科学理论的涌现→科学革命这四个阶段的循环中向前发展的。由此可知,如同政治系统、经济系统和社会系统的进化呈现长波规律一样,科学系统的进化也呈现长波规律。库恩所提出的科学发展的四个阶段也就是科学长波的四个阶段,同时又是科学长波的四种内在结构类型。

现在,我们用系统进化的周期发展规律,来考察科学系统进化的结构。首先要说明的是,在此我们所研究的不是科学系统的量波,即量上的周期性,而是质波,即质上的周期性。从对古希腊以来科学发展史的研究中可以知道,同其他系统一样,科学系统在进化过程中也依次经历 $E \rightarrow Q \rightarrow A \rightarrow C$ 这样的四个阶段。与这四种结构相对应的科学进化阶段及其生成条件如图 7—82。现将各阶段的特征简述如下。

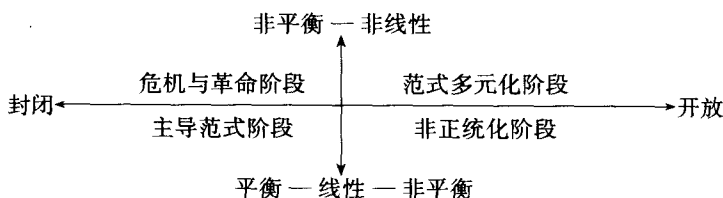


图 7—82 科学系统长波的四个阶段

主导范式阶段:其结构形式为平衡结构,也就是库恩所说的“常规科学”阶段。新的主导范式取代旧的主导范式,而整个科学系统在

① 库恩 T S. 科学革命的结构. 上海:上海科技出版社,1980

新确立的主导范式指导下建立与之相容的秩序和世界观,并趋于完善。

非正统化阶段:其结构形式为准平衡结构。在主导范式指导下,“常规科学”的适用范围继续扩大,其逻辑结构更趋于完善,但是同时又出现一些反常现象和反例,产生一些旨在解释这种反常现象和反例的新理论、新学说。这些新理论、新学说虽然在整体上并不违背主导范式,但是在局部上已开始背离主导范式。随着这种非正统化即异化过程的发展,科学系统将进入范式多元化阶段。

范式多元化阶段:其结构形式为活性结构。原来的主导范式已经或正在失去其主导地位。各种新学说、各种新理论、各种新范式四处涌现,科学发展迅猛,科学系统非常活跃。新旧范式的共存是这一阶段的一大特征。

危机与革命阶段:其结构形式为混沌结构。由于新学说、新理论、新范式的蓬勃发展,原来的主导范式和“常规科学”陷入危机,科学界陷入理论混乱。新旧学说、新旧理论、新旧范式之间的斗争趋于白热化。结果,或者有一种在上一阶段产生的新学说、新理论、新范式占据优势,或者有一种在这个阶段新出现的新学说、新理论、新范式占据优势,并得到更多的科学家的支持。

如果我们用以上的观点考察中世纪以来的物理科学发展,将近代科学以前的时期称为“亚里士多德周期”,将近代科学时期称为“牛顿周期”,将 20 世纪 20 年代开始的周期称为“爱因斯坦—玻尔周期”,那么就可编制表 7.6。不难看出,我们的科学进化模式与库恩的模式之间虽有不少共同点,但也有一些区别。

此外,汤浅光朝于 1962 年发表的一篇论文^①中对 1501—1950

^① 汤浅光朝. 科学活动中心的转移. 见:科学与哲学. 1979. (2):53—73;原载:日本科学史研究(英文版),1962. No. 1

年科技编年表里纪录的科学成果数和人物传记辞典里编选的有代表性的科学家人数做统计处理,并设定一个国家科学成果数占全世界总数的百分比超过 25% 为科学繁荣期,提供了以大约 80 年为一个周期的科学活动中心转移的周期规律,并指出科学中心转移的演进过程是:意大利(1540—1610)→英国(1660—1730)→法国(1770—1830)→德国(1810—1920)→美国(1920—)。这就是所谓“汤浅现象”。我相信,系统进化的周期规律将可用来分析“汤浅现象”所揭示的各周期的内部结构。

三、社会系统的管理战略

系统进化的基本规律不仅适用于自然系统,而且适用于社会系统。对社会系统的有效管理必须是对社会系统进化过程的管理,因此社会系统的管理战略应该建立在系统进化论基础上。现将社会系统管理的若干战略原则简述如下。

1. 系统进化管理原则

适用于大量复杂系统的系统进化规律是一条不以人的意志为转移的客观规律。人类既不能消除它,也不能超越它。因此,为了建立有效的管理战略,我们应当按照系统进化论的基本原理,既考虑系统进化的方向性,也考虑系统进化的周期性。

2. 系统谐振管理原则

社会系统管理是多目标决策过程,不仅要考虑政治波、经济波、科学波与技术波,而且要考虑所有这些波之间的谐振机制,不仅要作深入的理论探索,而且要掌握大量的数据。只有在所有这些研究的基础上,人类才有可能在社会生活中驾驭系统进化的周期规律,从必然王国走向自由王国。

3. 系统结构管理原则

在社会系统管理中,为了有效地应用系统进化的周期规律,不仅要考察各种波的波形,而且要考察其内在结构。如果我们只考虑基

表 7.6 物理科学系统的长波及其内在结构

	发展阶段	期 间	结构类型	主 要 事 项
亚里士多德周期	主导范式阶段	中世纪	平衡有序结构	亚里士多德—托勒密天文学与亚里士多德运动理论占统治地位
	非正统化阶段	文艺复兴初期至中期	准平衡结构	牛津学派修正亚里士多德运动公式,巴黎学派提出冲力说
	范式多元化阶段	文艺复兴后期	活性结构	哥白尼的日心说、开普勒的行星运动规律、伽利略的运动理论相继问世
	危机与革命阶段	17 世纪初期	混沌结构	亚里士多德学派与教会对日心说的迫害;日心说与伽利略运动理论的传播与胜利
牛顿周期	主导范式阶段	17 世纪中期—18 世纪中期	平衡有序结构	牛顿力学体系的建立、完善与确立主导地位
	非正统化阶段	18 世纪中期—19 世纪前半叶	准平衡结构	电学的发展;光的波动说的胜利;法拉第提出场概念
	范式多元化阶段	19 世纪后半叶	活性结构	麦克斯韦的电动力学、克劳修斯等人的热力学、波尔茨曼的统计力学相继问世
	危机与革命阶段	19 世纪末—20 世纪初期	混沌结构	牛顿力学世界观全面崩溃;普朗克的量子论、爱因斯坦的相对论、玻尔的原子结构理论相继问世
爱因斯坦—玻尔周期	主导范式阶段	20 世纪 20 年代—2000 年(?)	平衡有序结构	爱因斯坦的相对论和玻尔等人的量子力学确立其主导地位,正在发展中
	非正统化阶段	?	准平衡结构	?
	范式多元化阶段	?	活性结构	?
	危机与革命阶段	?	混沌结构	?

于各种系统指标而形成的波形变化的表现现象,忽略其内在结构的变化,就不能建立有效的社会系统管理战略。实际上,这正是过去的长波理论未能为社会系统管理提供有效战略的原因之一。

4. 相关因素管理原则

由于系统波的内在结构依赖于系统的封闭—开放、线性—非线性、平衡—非平衡因素,在社会系统管理中我们必须正确地调节所有这些因素。在这方面,一个重要任务乃是在社会系统中正确地规定这些因素的具体含义,为它们建立适当的测度。

5. 动态优化管理原则

无论层内进化还是层间进化都以现存系统结构或系统层次的不稳定性为前提。因此,在社会系统管理中,我们要力求防止或尽量减少来自不稳定性的破坏。当一种社会模式失稳而发生分叉时,我们要根据“损失最小,收益最大”的目标,采取一切有效措施,使社会系统进入最符合绝大多数人利益、最符合社会系统进化方向的新分支、新模式。就一个现存的稳定社会模式而言,重要的是既要避免僵化,又要避免溃散,也就是在稳定中求变化,在变化中求稳定,力求在整个过程中使系统处于优化状态。

6. 自他组织统筹管理原则

就整个历史进程而言,社会系统的进化是一个自组织过程,但是社会系统不同历史阶段的各个特殊事件却都是自组织机制和他组织机制的互动网络的结果。因此,在社会系统管理中,我们必须把自组织管理和他组织管理、直接控制和间接控制、硬控制和软控制、计划调节和市场调节有机地结合起来。

7.6 系统进化的因素与判据

7.6.1 系统进化的因素

本节的目的是根据以上的讨论概括系统进化的因素。我认为,系统进化的基本因素是开放、非平衡、非线性、涨落、选择与隔离。不过,这些因素在与其对立面地相互作用中决定系统进化的实际进程。

一、开放

在物理学中,通常把系统分为孤立系、封闭系与开放系(见本书4.3)。这三种系统表现出不同的进化行为。

首先,在孤立系中,热力学第二定律决定着系统的进化方向。一个与环境完全隔绝的系统最终要达到热力学熵取最大值的平衡无序态。

其次,在封闭系中,波尔茨曼有序原理决定着系统的进化方向。从赫尔姆霍茨自由能的定义

$$F = E - TS \quad (7.51)$$

可知,在温度和体积不变的情况下,平衡态是赫尔姆霍茨自由能取极小值的状态,而不是熵 S 取最大值的状态。当温度 T 下降时,内能 E 的减少对自由能的贡献可超过熵的减少对自由能的贡献,系统可处于一个低能低熵的有序状态。

在波尔茨曼的统计解释中,设系统处于某个能级 E_i 的几率为

$$P \propto \exp(-E_i/KT), i = 1, 2, 3, \dots \quad (7.52)$$

因此,在低温情况下该几率最大的状态是系统处于最低能级的状态,如图 7—83(a)所示,而在高温下几率最大的状态是系统中各粒子均匀分布于各能级的状态,如图 7—83(b)所示。也就是说,在低温下系统处于某种相对有序的状态,在高温下则处于某种相对无序的状

态。在经验上我们知道：当系统从高温下降到低温时，系统就从气态变成液态，再变成固态(如晶体)。

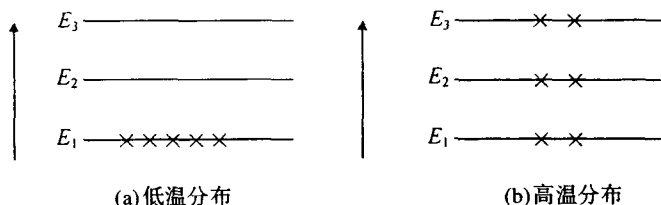


图 7—83 温度与状态

这样，波尔茨曼有序原理成功地解释了液体和固体中有序结构的形成机制。值得注意的是，这里所形成的有序结构是平衡结构，是一种“死”的结构。它的生成靠的是热量的放出，但它的维持可不需要任何物能流。

第三，在开放系中，系统呈现出要比封闭系和孤立系复杂得多、丰富得多的进化行为。在开放系中出现无序—有序、有序—有序、有序—混沌的各种转变，所生成的是动态有序的“活”的结构。贝塔朗菲、普里戈金、哈肯以及其他许多人都广泛讨论过开放系的进化行为。在本章的前几节，我们已对此作了大量引介与探讨。

就物理系统而言，一个与外界完全隔绝的系统只能朝着平衡无序态演进，而一个与外界交换能量或物能的系统可以走向(但并不一定)有序结构(或是平衡有序结构，或是非平衡有序结构)。可见，开放性乃是一个系统走向有序化的一个必要条件。如果说没有封闭性系统就不能存在，那么没有开放性系统就不可能有前进性进化。

从物理系统中得出的这些结论原则上也适用于非物理系统。对于非物理系统来说，我们需要从更广泛的意义上考察系统与环境之间的要素的交换、运动的交换和信息的交换。人们通常用控制变量对状态变量的作用来处理环境对系统的作用。但是，这种处理显然

有其局限性,因为在系统进化中不仅有环境对系统的作用,而且有系统对环境的作用,系统与环境之间的各种流起着作用;环境在改变系统,而系统也在改变环境。

二、非平衡

在本书 7.4.3, 我们已看到平衡与非平衡、平衡相变与非平衡相变的一般特征。

在平衡态中,系统只能发生平衡相变,从一种平衡结构转变为另一种平衡结构。

在近平衡态中,存在着系统与环境之间的非零流,细致平衡已被破坏。在无序平衡态附近,不可能产生有序结构;在有序平衡态附近,也不可能产生与平衡有序结构完全不同的新的有序结构。但是,这并不是说近平衡态必定向平衡态过渡。实际上,在不同的边界条件下,近平衡态的系统有不同的变化趋向。首先,在消除了引起非平衡的各种约束时,近平衡态将自发地趋向平衡态;其次,在一定约束下,近平衡态可长久地保持在非平衡定态,例如施加于一根铁棒两端的温差不变时,非平衡态将继续维持下去;第三,在适当约束下,近平衡态也可以向远离平衡态过渡。我们在本书 7.5 中所看到的准平衡有序结构属于第二种和第三种情况。显然,准平衡有序结构与它由之发展起来的平衡有序结构有着许多相似的结构特性和定性行为,但是也不能否认这两种结构之间,尤其在行为方面的某种质的区别。它是平衡结构与耗散结构之间的过渡结构,是“死”的结构与“活”的结构之间的中间结构。

在远离平衡态中,在一定条件下可发生非平衡相变。如在本书所提供的许多实例中所看到的那样,在远离平衡态中可产生各种各样的动态有序结构。普里戈金的“非平衡是有序之源”的论断所针对的是远离平衡态;在远离平衡态中所生成的有序结构是与平衡结构或准平衡结构根本不同的崭新的有序结构。

一个系统偏离平衡态的程度,即与平衡态的距离通常因控制变量大小而异。例如在方程(7.28)中,设 $t \rightarrow \infty$ 时的极限状态可用 q_i 表示,它随控制变量 α 而变化。假设在 $\alpha = \alpha_0$ 时系统的极限状态是平衡态,状态变量的值为 q_i^0 ;随着 α 偏离 α_0 ,非平衡定态的 q_i 也随之偏离 q_i^0 ;在到达 $\alpha = \alpha_c$ 之前,即在非平衡定态保持渐近稳定时, q_i 随 α 的变化是连续的和光滑的,如图 7—84 中的曲线(a)所示。曲线(a)上的每一点所对应的系统状态虽与平衡态不同,但仍可视为平衡态的自然延伸。这样,(a)被称为热力学分支。当 $\alpha \geq \alpha_c$ 即 α 的值偏离 α_0 足够大时,(a)的延续分支(b)变为不稳定,而新生成的两个分支((c)与(c'))是稳定的。(c)与(c')代表着

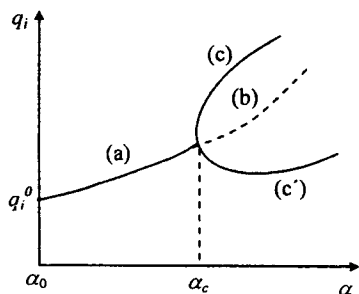


图 7—84 分叉现象

(a) 热力学分支;(b) 热力学分支的不稳定部分;(c) 和(c')耗散结构分支

新的有序结构即耗散结构。可见,当 α 变化到临界点时,很小的涨落都可以使系统离开热力学分支,跳跃到耗散结构分支(c)或(c'),耗散结构分支是当 α 远大于 α_0 ,即系统远离平衡时出现的。这就是我们在前面已述的分叉现象,也是对称破缺现象。因此,系统只有在远离平衡时才有可能产生与平衡结构根本不同的新的稳定有序的动态结构。

三、非线性

系统的控制变量与状态变量之间的关系可能是线性的,也可能是非线性的。例如,设 q 为状态变量, α 为控制变量, k 为另一参量,那么在反应



中, q 的时间变化可示为

$$\dot{q} = \alpha - kq \quad (7.54)$$

设 q_s 为定态值, 则

$$\alpha - kq_s = 0 \quad (7.55)$$

于是, 有

$$q_s = \alpha/k \quad (7.56)$$

这一结果如图 7—85(a) 所示。状态变量与控制变量之间的线性关系表明, 对于每一个 α 值, 有一个且仅有一个定态值 q_s , 而且两者之间的对应关系是线性的。当控制变量与状态变量存在着线性关系时, 系统的行为类似于平衡态的行为, 甚至在非平衡约束很强的时候也是如此。

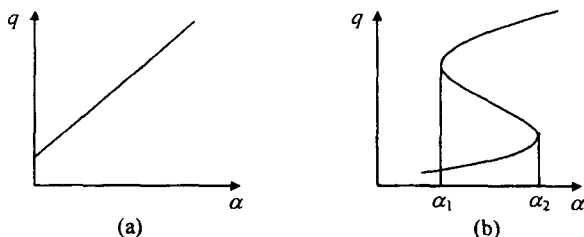


图 7—85 参数 α 对状态变量 q 的作用

(a) 线性律; (b) 非线性律

注意(b)中 α_1 与 α_2 邻近区域内响应的灵敏性

与此不同, 在图 7—85(b) 中, 定态值 q_s 与控制变量 α 之间关系为非线性时, 出现多样性和新结构的可能性。图中可知, 当 $\alpha < \alpha_1$ 或 $\alpha > \alpha_2$ 时, 所发生的情况与(a)类似, α 与 q_s 之间有一一对应关系。但是, 当 α 位于 α_1 与 α_2 之间时, 这个系统有三个定态值与一个控制变量值相对应。由此可知, 当控制变量与状态变量之间存在着非线性关系时, 系统有可能具有多重解, 发生分叉, 出现非平衡相变, 生成新的有序结构。

值得重视的是非平衡因素与非线性因素之间的关系问题。一方

面,远离平衡并不一定导致系统的非平衡相变。例如,在大多数化学反应系统中,不管化学反应多么远离化学平衡,只要提供适当的外界条件,非平衡定态通常都能保持其稳定性,因而不可能发生非平衡相变。发生非平衡相变的又一必要条件是动力学过程中必须含有适当的非线性反馈机制。这在数学上表现为系统进化方程必须含有非线性项或非线性关系,它的解具有多重性,其中有的稳定,有的不稳定。

另一方面,虽然说导致非平衡相变的动力学方程必须是非线性的,但是如果系统不保持与平衡态的适当距离,即是说,系统如不远离平衡,非线性本身也不可能导致多重解、分叉与非平衡相变。这就是说,非平衡乃至远离平衡并不保证非平衡相变的发生,非线性也不保证非平衡相变的发生;为了发生非平衡相变,必须有远离平衡与非线性相干作用的结合。

非线性因素不仅在非平衡相变中起着重要作用,而且在平衡相变中也是不可缺少的。我们已经知道,在非平衡相变中非线性是源于动力学的。但是在平衡相变中,非线性是由于分子或原子之间的吸引和排斥,如同从描述气液相变的范德瓦耳斯方程或描述铁磁—顺磁相变的非线性方程中所能知道的那样。在理想气体或理想溶液中是不可能发生平衡相变的,平衡相变的发生依赖于分子或原子之间的相互作用,实际上这就把非线性因素作为一个必要条件引入到平衡相变理论中去了。由此我们又可知道,在系统进化中非线性确是一个十分重要的因素。

在系统研究中,我们需要处理各种各样的非线性关系,如要素与要素、要素与系统、输入与输出、控制变量与状态变量之间非线性关系。现实的具体的系统都是非线性的。例如,在一个由两个子系统构成的系统中,即使两个子系统被看作是线性的,但只要两个子系统之间的关系是非线性的,那么该系统还是非线性的;即使两个子系统之间的关系是线性的,但只要这些子系统是非线性的,那么该系统也

是非线性的。因此,系统研究,尤其是系统进化的研究,无处无时不与非线性打交道。

四、涨落

涨落亦称起伏。一般来说,由于种种原因,表征系统某种性质的测度,在任一瞬时的值与其长时间内的平均值总有某种偏差。这种现象称为涨落现象。例如,商品价格围绕其价值的波动,热动平衡系统中气体密度分布的瞬时不均匀,电子管和无线电路中由于电子的无规则热运动而造成的涨落电流,生物进化中的突变,等等。有时称引起涨落现象的各种作用为涨落(或涨落力),涨落大小称为涨落值(或涨落)。

对于一个由大量要素组成的系统来说,涨落是不可避免的。考虑一个系统的宏观状态,其中随机变量 X 取值为 $x_i, i=1,2,\dots,n$ 的概率为 $P\{X=x_i\}$,则把 $P(x_i) = P\{X=x_i\}$ 叫做 X 的概率分布函数。易知, $P(x_i)$ 必须是一个非负的归一化函数,即

$$P(x_i) \geq 0 \quad (7.57)$$

$$\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

那么 X 的平均值为

$$\langle X \rangle = \sum_{i=1}^n x_i P(x_i) \quad (7.58)$$

由于涨落, X 不会总是取值 $\langle X \rangle$, 与 $\langle X \rangle$ 会有某种偏离。这时, 差值 $(X - \langle X \rangle)$ 的平方的平均值 $\langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle$ 称为方差, 记为 $\langle (\Delta X)^2 \rangle$, 即

$$\begin{aligned} \langle (\Delta X)^2 \rangle &= \langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle \\ &= \sum_{i=1}^n (x_i - \langle X \rangle)^2 P(x_i) \quad (7.59) \\ &= \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \end{aligned}$$

方差表示瞬时值 X 偏离平均值 $\langle X \rangle$ 的平均程度。方差的平方根 $\sqrt{\langle (\Delta X)^2 \rangle}$ 称为涨落值, 涨落值与平均值之比称为相对涨落, 记为

$$\delta = \frac{\sqrt{\langle (\Delta X)^2 \rangle}}{\langle X \rangle} \quad (7.60)$$

相对涨落可很好地表示涨落的强烈程度。若 δ 大, 表示 X 的值远离平均值 $\langle X \rangle$; 若 δ 小, 表示 X 的值接近于平均值 $\langle X \rangle$ 。

在系统进化过程中, 当系统远离相变点时, 涨落相对于平均值是很小的, 即使偶尔出现大的涨落, 也会立即衰减, 系统总要回到平均值附近。无论在平衡态中还是在非平衡态中都是如此。但是, 在相变点附近, 涨落有很大的反常, 随机的小涨落通过相干作用增大成巨涨落, 即使在控制参量不变的情况下, 也会使系统发生不稳定性, 驱使系统在临界点发生相变, 并产生新的稳定有序结构。这时候, 涨落值与宏观平均值有相同的量级, 因而不能忽略。正如普里戈金所说, 这时的涨落是产生新结构的触发器。

因为涨落是随机的, 所以在非平衡相变的分叉点, 涨落驱使系统进入哪个分支是随机的。例如, 在图 7—45 中, 涨落可使系统进入上面的分支 (即 B), 亦可使系统进入下面的分支 (即 C)。对一个系统来说, 只能在两者中取一个分支。对于大量系统的集合即一个系综来说, 其中一部分系统将进入上面的分支, 另一部分则进入下面的分支。类似的考虑也完全适用于一个系统内部出现多个不同类型稳定模式的情况。

我们以布鲁塞尔器为例, 更详细地考察分叉点附近的系统进化行为。图 7—86 中 (a) 表示确定性方程中状态变量 q 对控制参量 α 的依赖关系, 当 α 增大到一定程度时系统发生分叉, 并出现两个稳定分支即 q_- 与 q_+ 。状态 q_- 与 q_+ 的稳定性既可相同亦可不同。假定在 $\alpha = \alpha_m$ 时, 状态 q_- 的稳定性不如 q_+ 的稳定性, 也就是在 (b) 中 q_+ 处的势小于 q_- 处的势, 那么, 当 $t = t_0$ 时峰值在 $q = q_-$ 处的初始概率

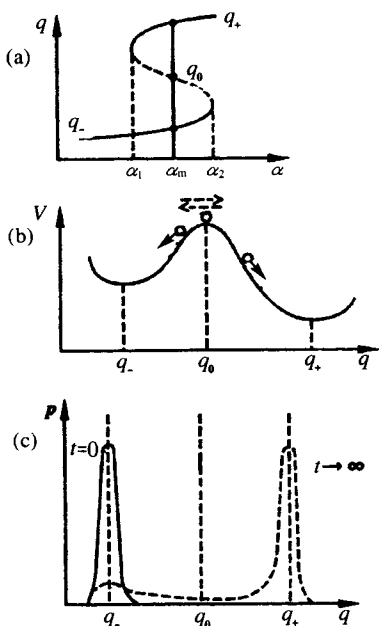


图 7—86 涨落诱发的同时
稳定态间的相变

尼科里斯 G 等. 探索复杂性.

成都: 四川教育出版社, 1986. 189—190

分布, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 最终将趋向双峰型(图中以虚线表示), 且 q_+ 处的峰比 q_- 处的峰大得多, 如(c)所示。这表明, 就一个系综而言, 其中大部分系统将进入 q_+ 分支, 一小部分系统进入 q_- 分支。

上面所考察的涨落是在系统内部自发产生的, 称为内部涨落。此外, 还需要考虑的是控制变量的涨落, 称为外部涨落或外噪声。由于状态变量受着控制参量的控制, 外部涨落也会影响系统的宏观行为, 尤其在非平衡相变点即分叉点附近外部涨落通过改变控制变量产生对系统宏观行为的巨大影响。结果是或者使分叉点发生移动, 或者产生新的分叉点, 引起新的非平衡相变。

总之, 当我们所考虑的是一群系统或一个系综的进化时(实际上, 在系统进化研究中, 虽然我们经常研究系统个体的进化行为, 但是现实的进化过程是群体行为, 而不是个体行为), 涨落会驱使一些系统进入某种有序结构, 同时驱使另一些系统进入与之不同的有序结构, 而所生成的各种不同的有序结构就成为该系综进一步进化的材料。

五、选择

如上所述, 涨落是系统进化的触发器, 可为系统进化提供材料, 人们通常把涨落使一个系统进入某一分支而不进入其他分支的行为

称为选择。对于一个系统来说,这的确是一种选择。对于系统个体的进化而言,对分叉分支的选择起着非常重要的作用,它决定着系统未来的进化轨道。这种选择是一种随机行为。另一方面,考虑到系统进化中更重要的是群体行为,在整个系统进化进程中更为重要的是对已进入不同分支的各个系统的选择机制,这种选择不是发生在分叉点,而是发生在分叉之后。涨落没有方向性,但进化是有方向性的,而决定系统进化方向的因素是选择。简言之,涨落为系统进化提供材料,而环境选择决定系统进化的方向。只有那些能适应环境的系统才能生存下来,并继续其进化行为,否则就会被淘汰。

我们再来看图 7—86(c)。其中,当 $t \rightarrow \infty$ 时, q_+ 处的系统个体远多于 q_- 处的系统个体,这是由于涨落的随机性和两个分支稳定性的差异。这两个分支上的系统虽然其稳定性的强弱有别,但它们都是稳定系统,它们都有存在和发展的可能性。但是,在实际的进化过程中,具有不同宏观有序结构的不同类系统之间发生激烈的竞争,其结果或者是更适应于环境的一类系统个体生存下来,或者是不同类系统个体彼此稳定地共存。就同一系综而言,通常是只有一类稳定系统个体生存下来。这时谁胜谁负,谁存谁亡,就取决于不同分支上诸系统的适应性,“适者生存,不适者淘汰”的选择机制起着决定性作用。因此,在系统进化中,如同在生物进化中那样,有利于适应的涨落被保存,不利于适应的涨落被淘汰,系统在涨落与选择的共同作用下实现进化,从而谱写出系统进化的历史。

这里,说明环境选择在系统进化中所起作用的很有说服力的一个例子是生物大分子在我们周围自然界中的进化^①。氨基酸分子有两种异构物,一种是 L 型,另一种是 D 型。在一般情况下,实验室里合成出来的氨基酸是这两种异构物的混合物,两者的比例为 1:1。L

① 周国城,陈念贻. 量子生物学中的若干问题. 化学通报, 1978. (5)

型氨基酸形成右手螺旋肽, D 型氨基酸形成左手螺旋肽。如果在右手螺旋肽中加入 D 型氨基酸, 就会破坏右手螺旋肽的稳定构象。然而人们在 19 世纪已发现地球上的生物体只含有一种异构物。例如, 所有蛋白质都是由 L 型氨基酸所组成, 不含任何 D 型氨基酸。在酶催化反应中, 由于酶分子都是由 L 型氨基酸所组成, 反应产物都是 L 型异构物。甚至还有一种特殊的酶即 D-氨基酸氧化酶, 它的作用是专门破坏 D 型氨基酸, 以维持生物体内旋光性质的纯度。这说明氨基酸分子的不对称性导致蛋白质分子螺旋肽的不对称性, 而后的不对称性反过来加强前者不对称性的纯度, 结果导致了生物大分子不对称性的放大和变纯。因此, 在生物大分子的漫长的进化过程中, 只要一一开始是 L 型氨基酸占优势, 则生物体内的氨基酸都成为 L 型的。

这样, 所要解决的问题是 L 型氨基酸最初如何占了优势。我们现在可以说这是环境选择的结果。当人们用“左手”电子雨和“右手”电子雨来轰击消旋的亮氨酸晶体时, 在前者的情况下晶体的 D 型亮氨酸破坏较多, 在后者的情况下 L 型亮氨酸破坏较多, 其差额约为 1%。而我们从李政道、杨振宁关于在弱相互作用中宇称不守恒的理论可以知道, 在我们周围自然界的 β 衰变中, 电子的发射是不对称的, “左手”电子对于“右手”电子占优势。因此, 在这样的环境中, L 型氨基酸被选择并占优势是理所当然的。当有人设想在一个反物质的世界里, 生物大分子很可能是由 D 型氨基酸组成的时候, 我们就不能简单地否定其中的合理性。

六、隔离

隔离在系统进化中也起着重要作用。在一个系统的演进过程中, 一个模式与另一个模式的分离、一种模式同另一种模式的分离都通过隔离机制实现; 在一个系综的演进过程中, 一个类型系统与另一些类型系统的分离也是通过隔离机制实现的。隔离是不同个体的系

统模式、不同类型的系统模式以及不同层次的系统模式型赖以共存的一个必要条件。例如,在前面所讲的贝纳德花纹中,当六边形花纹已形成时,液体的流动在六边形中心是由下朝上,在周边则是由上朝下。正是周边的这种流把一个六边形同另一些六边形分离开来。在贝洛索夫-扎鲍廷斯基反应中,宏观波形图样表明两个波在什么地方相碰,它们就消失在那个地方,而不同模式的共存是通过隔离机制实现的。又如,在统一的国家内部,两种不同社会模式的共存也依赖于隔离机制。

隔离可分为环境隔离和结构隔离。由于环境隔离,在不同环境中可以产生和存在其他环境中所没有的系统类型。据迄今为止的资料,生命仅仅是地球的光荣,其他星球还无法享受这一荣誉;地球上的生命与L型氨基酸有关,而与D型氨基酸有关的生命被排斥到反物质世界中去了。结构隔离(指由于结构上的原因而造成的不同系统之间的隔离)具有特别重要的意义。在生物界里常见的生殖隔离是结构隔离的一个典型例子。在无机界中结构隔离更为明显。元素周期表中的不同元素可以看作是在漫长的物质进化中通过彼此隔离而形成的,在有些元素之间甚至已经消失了相互结合成化合物的可能性。地球表面上固体、液体和气体可以并存,它们决不会融合成一种均匀的糊状物。由于结构隔离,不同的系统即使处于同一个环境,也不会丧失其独立性。

这样,由于隔离机制起作用,本来属于同一系综的不同系统可以分化成不同系综的系统,不同的系统个体、不同的系统类型以及不同的系统层次可以并存和独立发展。

7.6.2 系统进化的判据

如上所述,系统在层内进化中从简单结构演进到复杂结构,在层间进化中从低层次演进到高层次。这显然指的是前进性发展。但

是,在系统的无序—有序、有序—有序,有序—混沌转变中,既有前进性发展,又有退化。为了判断系统进化的方向性、程度和速率,需要有某种判据。迄今为止,人们为解决系统朝着哪个方向进化,在何种情况下产生何种结构,在何种情况下产生何种吸引子,系统的有序度是在增大还是在减少等问题,提出了各种各样的判据,例如物理熵判据、广义熵判据、价值判据、功能判据、稳定性判据、信息判据、维数判据等。但是,据目前的研究情况看,似乎还没有一种判据是系统进化的普适判据。下面,我们介绍并讨论其中几个判据。

一、物理熵判据

物理熵可以说是人们为判断系统进化的方向性而提出的第一个科学判据。但是物理熵判据的局限性是显而易见的。

普里戈金等人的工作已表明,就热力学系统而言,在平衡区,李亚普诺夫函数是熵,平衡态是稳定的;在线性非平衡区,李亚普诺夫函数是熵产生,定态是渐近稳定的;而在非线性非平衡区,李亚普诺夫函数是超熵,超熵产生可作为系统稳定性判据。这就意味着熵本身已不能作为判断系统进化方向的普适判据。我们从平衡相变的讨论(见本书 7.4.3)中已看到,在一级相变中,相变前后的熵取不同的值,因此可用熵来表示系统物态有序结构的变化。但是在二级相变中,相变前后的熵值保持不变,而系统的对称结构却发生了变化。至于非平衡相变而言,熵的变化与系统结构的变化之间的关系更为复杂。

另一方面,人们已知道:在孤立系统中,熵单向地增加,最终达到熵极大的平衡态;但是在开放系中,由于 $dS = d_i S + d_e S$, 系统的熵变即 dS 可正可负可零。据此,人们曾认为,当系统的熵减小,即 $dS < 0$ 时,开放系统就能形成有序结构。但是,这种看法是错误的。例如,考察一个由大量分子组成的热力学系统。当这个系统为孤立系时,熵最大的状态、最无序的状态、几率最大的状态是等价的。当比较这个孤立系的两个状态时,高熵状态即为高度无序的状态。但是,在开

放系中,就不能说熵最大的状态是最无序的状态。当比较一个开放系的两个状态时,高熵状态既有可能是高度无序的状态,也有可能是高度有序的状态。出现这种“令人惊奇”的现象的关键在于:在对孤立系的两种状态进行比较时,作为约束条件的能量是常数,但是在对开放系的两种状态进行比较时,两种状态的能量约束互不相等。换言之,孤立系的两种状态是在相同的能量约束下形成的,而开放系的两种状态是在不同的能量约束下形成的。因此,当人们从普里戈金的开放系统熵原理出发,简单地认为系统状态从无序变为有序时系统的总熵必定减小的看法实际上是将孤立系的逻辑机械地应用到开放系而得出的错误推论。在开放系中,系统有序度的增加与熵的增加是可以并行发生的,亦即说,熵的增加未必导致有序度的减小。

从上可知,熵不可能是热力学系统进化的普适判据。它只在非常有限的范围内才能算是热力学系统的进化判据。对于热力不起主导作用的物理系统以及非物理系统来说,就更不能把熵当作系统进化的判据。至于熵与序之间的各种似是而非的看法,我们已在本书6.2.3作了较详细的讨论。

二、信息判据

信息在系统研究中的重要性以及其良好的定量描述使得人们试图把信息作为系统进化的一个判据,认为当系统从简单结构向复杂结构演进时,系统的信息量也增加。这在相当广泛的领域已得到说明,但是信息量能否作为系统进化的普适判据,尚有一些问题有待研究。

设一系统在时刻 t 的状态为 q_t ,在时刻 $t + \Delta t$ 的状态为 $q_{t+\Delta t}$,那么在 q_t 与 $q_{t+\Delta t}$ 之间有下列四种关系^①。

① 这里主要参考了山内康英与黑石津的论文。但是,他们所考察的不是系统进化判据问题,而是根据“ t 时刻的系统状态”在多大程度上预知“ $t + \Delta t$ 时刻的系统状态”。山内康英,黑石津. システム理論と秩序の形成. 见:公文俊平,高原康彦(编). 一般システム研究の成果と展望. 横浜:GSR研究会,1987. 361—378

(1) q_t 是 $q_{t+\Delta t}$ 的充要条件,如图 7—87 所示。在经典力学中, q_t 能明确惟一地决定 $q_{t+\Delta t}$,两者之间存在着——对应关系,所发生的一切事件对于时间是对称的,既无信息量的增加,亦无信息量的减少。因此,如知道系统现在的状态,就能知道它的过去和将来。

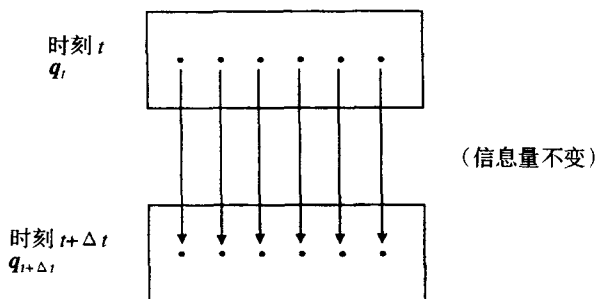


图 7—87 充要条件

(2) q_t 是 $q_{t+\Delta t}$ 的充分条件,但不是必要条件,如图 7—88 所示。根据热力学第二定律,对于孤立系统来说,不管其过去或当前状态如何,最终都要达到熵最大、信息量最少的平衡状态。这是系统单向地失去信息的演进过程。由于任意时刻的状态最终都达到相同的终态,对于观察者来讲,不管是否了解系统现在处于何种状态,都能确定终态是热力学平衡态。

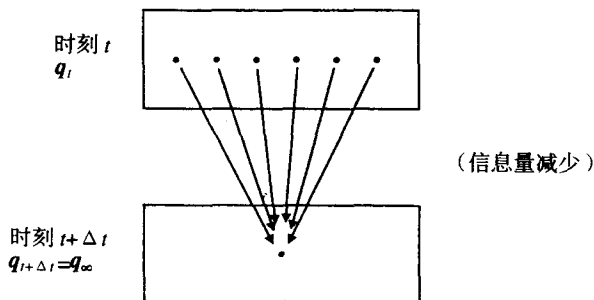


图 7—88 充分条件

(3) q_t 是 $q_{t+\Delta t}$ 的必要条件,但不是充分条件,如图 7—89 所示。这里所出现的或者是系统从外界获取信息的过程(他组织),或者是系统信息的自创生过程(自组织),或者是既有信息输入又有信息创生的过程(自组织与他组织的结合过程)。因此,这是一个信息量增加的过程。可知,如果在系统进化过程中发生分叉或非平衡相变,就不可能单靠 q_t 的信息来判断系统将进入哪个分支,取得哪一种结构。为了知道系统在 $q_{t+\Delta t}$ 中实际实现的是哪一个状态,除了有关 q_t 的信息外,还必须具备其他信息。我们无法从系统的现时状态预知它的未来状态,但可以从系统的现时状态推知它的过去状态。

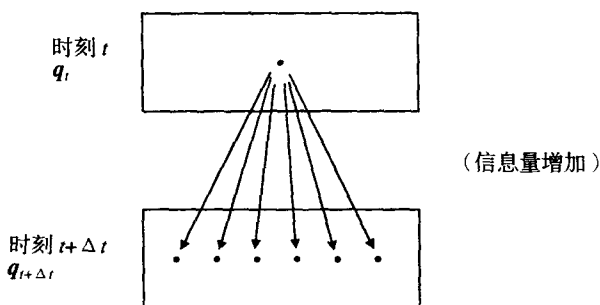


图 7—89 必要条件

(4) q_t 既不是 $q_{t+\Delta t}$ 的充分条件,也不是 $q_{t+\Delta t}$ 的必要条件,如图 7—90 所示。迄今为止,似乎没有一门理论科学系统地处理和研究这种情况,但是在经验科学领域这是司空见惯的。例如,很多经验公式并不要求它们藉以成立的经验数据是其充分条件,也不要求那些数据是其必要条件。在系统进化的许多实例中, q_t 与 $q_{t+\Delta t}$ 之间也存在着类似的关系。结果, q_t 未必导致 $q_{t+\Delta t}$, $q_{t+\Delta t}$ 未必来自 q_t 。

从上可知,在(1)中,系统不发生进化,时刻 t 和时刻 $t + \Delta t$ 的信

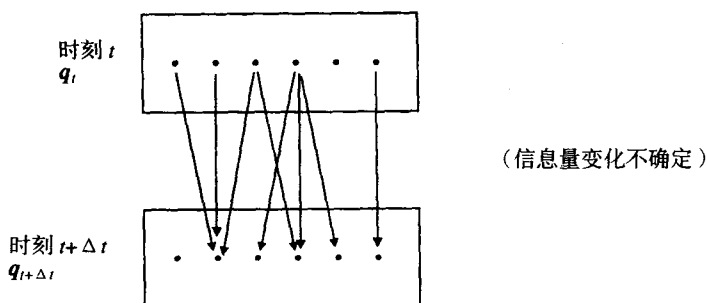


图 7—90 既非充分条件亦非必要条件

息量不变。在(2)和(3)中,用信息量的变化可描述系统进化过程。在(2)中,时刻 $t + \Delta t$ 的信息量少于时刻 t 的信息量,所发生的是系统的退化即有序结构的消失;在(3)中,时刻 $t + \Delta t$ 的信息量多于时刻 t 的信息量,即有新的有序结构生成。

但是,在(4)中,时刻 $t + \Delta t$ 的信息量可能大于、小于或等于时刻 t 的信息量;无论在哪一种情况下,都有可能发生上面所述的结构不变、结构退化或新结构生成的三种现象之一。因此,无法用 q_t 的信息量和 $q_{t+\Delta t}$ 的信息量来判断从 q_t 到 $q_{t+\Delta t}$ 的转变中所发生的是其中的哪一种现象。这就是说,在(4)的情形中,系统进化的信息判据就失效,无法用信息量的大小来判断系统进化的方向性。

另一方面,在(3)的情形中,虽然可用信息量来表征系统进化的方向性,但是只靠信息的量的侧面我们还是无法判断所出现的是什么样的有序结构。在系统进化中,与信息量变化相比,更重要的新结构、新层次、新信息的创生。

三、李亚普诺夫指数

在本书 7.3.2、7.4.2 和 7.5.2 中我们已看到,在系统进化过程中出现各种各样的吸引子,如不动点、极限环、环面和混沌吸引子。为判断系统在何种情况下出现何种吸引子,需要一种普适的发展判

据。目前已知的一个重要判据是所谓李亚普诺夫指数^①。它所描述的是在相空间中开始接近的两个轨道随着时间推移而发散开来的平均指数速度。

为引入李亚普诺夫指数,先考虑单变量的情形,设它遵守非线性微分方程

$$\dot{q} = N(q) \quad (7.61)$$

这时,惟一可能的吸引子是一个稳定不动点,它的“轨道”是表示不动点位置的常数 $q = q_0$ 。为了检验该点的稳定性,引入小的含时偏差 $\delta_q(t)$,则

$$q(t) = q_0 + \delta q(t) \quad (7.62)$$

代入式(7.61),得线性方程

$$\frac{d}{dt} \delta q = L \delta q \quad (7.63)$$

其中 $L = \left. \frac{\partial N}{\partial q} \right|_{q=q_0}$ 是一个常数。求解方程(7.63),得

$$\delta q(t) = \delta q(0) e^{Lt} \quad (7.64)$$

可知,若 L 为负,则该不动点是稳定的。取 $t \rightarrow \infty$ 的极限,得

$$L = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln |\delta q(t)| \quad (7.65)$$

为得到李亚普诺夫指数概念,将 $q(t)$ 推广为 $\mathbf{q}(t)$,即在高维相空间中沿轨道运动的向量,并检验系统在轨道 $\mathbf{q}_0(t)$ 邻域中的行为。令

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_0(t) + \delta \mathbf{q}(t), \quad (7.66)$$

就可用 $\delta \mathbf{q}(t)$ 检验 $\mathbf{q}(t)$ 的行为,即它是趋近还是离开 $\mathbf{q}_0(t)$,将式(7.66)代入非线性方程

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = N(\mathbf{q}(t)) \quad (7.67)$$

① Haken H. *Advanced Synergetics*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 42—45, 79—81; 尼科里斯 G 等. 探索复杂性. 成都: 四川教育出版社, 1986. 273—287

并使 N 对 $\delta \mathbf{q}(t)$ 线性化, 得

$$\frac{d}{dt} \delta \mathbf{q}_j(t) = \sum_k \frac{\partial N_j(\mathbf{q}(t))}{\partial \mathbf{q}_k} \bigg|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0} \delta \mathbf{q}_k(t) \quad (7.68)$$

这是一组具有含时系数 $(\partial N_j / \partial \mathbf{q}_k)$ 的线性微分方程。这时, 李亚普诺夫指数定义为

$$\lambda = \limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln |\delta \mathbf{q}(t)| \quad (7.69)$$

李亚普诺夫指数表征系统在相空间中运动的不稳定性和对初始条件的敏感性。该指数的值总是实数, 可正可负可零。在 $\lambda < 0$ 的方向, 相空间体积收缩, 运动稳定且对初始条件不敏感; 在 $\lambda > 0$ 的方向, 轨道迅速分离, 长时间行为对初始条件敏感, 运动最终呈混沌状态; $\lambda = 0$ 则对应于稳定边界, 初始误差不放大也不缩小。

对于 $t = t_0$ 时 $\delta \mathbf{q}(t)$ 的不同初始值, 可能存在着不同的李亚普诺夫指数, 但是不同李亚普诺夫指数的数目不会多于 N (或 $\mathbf{q}$) 的向量空间维数 m 。下面看在不同维数下如何用李亚普诺夫指数来区分各种吸引子。

(1) 当 $m = 1$ 时, 只有稳定不动点, $\lambda < 0$ 。

(2) 当 $m = 2$ 时, 只能有两种吸引子, 即稳定不动点或极限环。当为稳定不动点(焦点)时, 两个李亚普诺夫指数(它们可相同)皆为负, 即 $(\lambda_1, \lambda_2) = (-, -)$; 当为稳定极限环时, 对于极限环 $\mathbf{q}_0(t)$ 横向运动的 $\delta \mathbf{q}$ 的李亚普诺夫指数是负的, 而沿极限环切线方向的 $\delta \mathbf{q}$ 的李亚普诺夫指数等于零, 即 $(\lambda_1, \lambda_2) = (-, 0)$ 。但是, 当 $(\lambda_1, \lambda_2) = (-, 0)$ 时, 可能出现一条由不动点组成的线, 不存在极限环, 可看作一种“病态”情形。

(3) 当 $m = 3$ 时, 会出现下列各种情况(假定每种情况都存在吸引子 $\mathbf{q}_0$, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $|\mathbf{q}_0|$ 保持有界):

$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (-, -, -)$ 稳定焦点

$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (-, -, 0)$ 稳定极限环

$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (-, 0, 0)$ 稳定环面

如果有正的李亚普诺夫指数,应会发生各种不同情况,例如:

$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (+, 0, 0)$ 可能为不稳定环面

$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (+, +, 0)$ 可能为不稳定极限环

$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (+, 0, -)$ 混沌吸引子

在守恒系统中相空间体积保持不变,所以其李亚普诺夫指数为零;在耗散系统中,吸引子的出现意味着相空间体积的整体收缩,所以或者是全部的李亚普诺夫指数为负(稳定不动点),或者是有的李亚普诺夫指数为负,其他为零。也就是说,如果 $q(t)$ 是保持在一个有界区域中的轨道,并且不结尾为一个不动点,那么至少有一个李亚普诺夫指数为零。而在守恒或耗散系统中混沌运动的出现意味着相空间体积沿某些方向膨胀,沿其他方向收缩,即既有正的李亚普诺夫指数,也有负的李亚普诺夫指数。

从上可知,李亚普诺夫指数可用来说明各种吸引子的意义,并说明在何种情况下出现何种吸引子。但是,考虑到用非线性方程研究系统进化尚存在着许多至今无法克服的困难,而且在李亚普诺夫指数符号完全相同的情形下也会出现不同吸引子,因此,作为系统进化判据,李亚普诺夫指数的“普适性”也是有局限性的。不少问题有待进一步研究。

我们在上面简要地考察了系统进化的李亚普诺夫指数判据、信息判据和物理熵判据。这些判据从不同的角度刻划了系统的进化。这些判据都有其成功之处,但又都有其不足之处。对其他现有的系统进化判据的讨论也表明,单个地讲,没有一个判据是“普适”的。每个判据都有其特定的适用范围或适用侧面,但又都有其局限性。考虑到系统及其进化的复杂性,有必要在现有的各种进化判据的基础上建立一个综合判据体系。也有必要进行其他方式的努力,例如对

不同类型的系统建立与之相应的进化判据。不管怎样,系统进化判据问题是系统进化论目前特别需要研究的问题之一;如无较完善的系统进化判据,系统进化论在理论上的发展和实际中的应用都会遇到严重的困难。

附录 现代系统理论研究概况

在现代系统研究中,自从贝塔朗菲提出“一般系统理论”以来,先后出现了几十种系统理论,但至今还没有关于“系统理论”的严格定义,也没有一种能够把各种“系统理论”整合起来的统一理论。现代系统研究的一个重大课题是如何在这些系统理论的基础上建立一种统一的“系统理论”,即我们现在所说的“系统学”。本书是我在这方面长期摸索的结果。理所当然,我在自己的研究过程中,学习、参考和利用了其他人的大量研究成果。这里,我向读者简要地介绍各种现代系统理论的大致内容^①。

从各种系统理论的名称看,可将它们分为下列几种:

第一,是“异姓同名”的系统(理)论。例如,一般系统(理)论、一般生命系统理论、动态系统理论、概率系统理论、模糊系统理论、大系统理论、灰色系统理论、泛系理论。这些理论虽都被称作“系统(理)论”,但因它们的“姓”不同而互不相同。单靠这些理论的“名”——

^① 如我在第一版前言中所说,我曾在“国外系统理论研究”(上,中,下)一文(中国自然辩证法研究会主办《自然辩证法研究》1986年第1—3期)和“Major systems theories throughout the world”[国际系统科学学会(ISSS)主办“Behavioral Science”1990年第2期;此刊现与Systems Research合并为Systems Research and Behavioral Science,是国际系统研究联合会(International Federation for Systems Research)的机关刊物]一文中介绍各种现代系统理论,并阐述过自己的系统科学体系和系统学体系。考虑到国外不少系统理论著作已经以全译、编译或编著的方式被介绍到国内,这里我将简要介绍各种系统理论的基本构架和最基本内容。选材时,我考虑到了这些理论的重要性、国内已介绍的情况以及对我的研究工作的影响等。

“系统(理)论”就无法知道所说的是哪一种系统(理)论。

第二,是“同姓同名”而不同内容的系统(理)论。例如,“一般系统(理)论”一词被许多学者用来表示他们的系统(理)论,其中比较出名的有贝塔朗菲的,乌约莫夫的,萨多夫斯基的,梅萨洛维克的,怀莫尔的,克里尔的和巴克莱的“一般系统(理)论”。但是,不仅他们对“一般系统(理)论”的理解互不一致,而且他们所建立的“一般系统(理)论”体系也各不相同。“一般系统(理)论”被看作是一种逻辑—数学理论(贝塔朗菲,乌约莫夫),或一种形式理论(贝塔朗菲,梅萨洛维克,怀莫尔),或一种方法论(艾什比,克里尔),或一种思考方式〔贝塔朗菲,车奇曼(Charles West Churchman, 1913—2004)〕,或对世界的一种考察方式〔温伯格(Gerald Marvin Weinberg)〕,或一种元理论(萨多夫斯基,米勒),等等。因此,“同姓同名”的系统(理)论,如不注明那是哪一家的,就无法知道所说的是哪一个系统(理)论。

第三,一些不用“系统(理)论”一词来称呼的系统(理)论。例如,“协同学”、“控制论”、“信息论”、“控制理论”、“资源物理学”、“耗散结构理论”等都可以看作是系统(理)论,但它们却不用“系统(理)论”一词来称谓。判断一个理论是不是系统(理)论,应该看它的实际内容,决不能只看它的名称。

在使用“系统(理)论”一词时,我们还要注意它在不同地区有着不同含义。例如,欧洲人往往把控制论和“系统理论”等同起来,认为这些理论既研究信息控制问题,也研究物能问题。与此不同,美国人通常把控制论理解为只研究信息控制问题的理论,而他们所说的“系统(理)论”的研究对象包括物能过程和信息过程,结果是把控制论包括在系统(理)论范畴之内。

此外,不同语言之间的翻译上出现的问题也会造成混乱。例如,“系统(理)论”原来是德语国家科学家的创造,而它在德语中有两种表达方式即 Systemlehre (贝塔朗菲首创)和 Systemtheorie (屈弗缪

勒首创),两者实际内容大不相同。但是,英语和汉语中这两者都被译作 System theory 和“系统(理)论”,通常不予区别。又如,汉语中的“系统论”对应于两个英文词,其一是 Systemism,亦可译为“系统主义”,纯属哲学用语,不表示科技上的系统(理)论,其二是 System theory,亦可译为“系统(理)论”。这两个英文词的区别还是明显的,但是汉语中的“系统论”无法体现这种区别。为此,在本书中我用“系统论”表示 Systemism,用“系统理论”表示 System(s) theory。

仅从以上叙述亦可知道,在现代系统理论研究中确实存在着术语上的混乱。我认为个中原因主要在于:首先,系统科学是一个年轻的科学研究领域^①,而每一个新兴科学在它的发展初期都不可避免地发生术语上的混乱或不一致,尤其是系统科学在短时间内取得迅猛发展,又加剧了这种混乱。第二,系统运动在短时间内波及全世界广阔地区,而不同地区的人们有着不同的语言和语言习惯,从而往往以不同的术语来描述相同的对象,或者对相同的术语持有不同的理解。最后,被卷入系统运动的学者中有生物学家、心理学家、数学家、物理学家、社会学家、经济学家、环境科学家、工程学家或哲学家,他们有着不同的知识背景和不同的具体研究课题,因而用不同的术语来表述他们各自的系统(理)论或对“系统(理)论”一词持有不同的理解,也是不足为奇的。

为了叙述之便,我们将从各种系统(理)论的知识背景出发,将现存的各种系统(理)论分为下列几类:

- 一、以生物学和/或心理学为背景的系统理论;
- 二、以物理学为背景的系统理论;

^① “Systems science”(系统科学)一词何时最早出现,尚未考证。但是,早在 20 世纪 60 年代,贝塔朗菲在他的论著中已经使用这一概念。见: Bertalanffy L. v. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968. 3—29, 89—94

- 三、以数学为背景的系统理论;
- 四、以控制论和/或信息论为背景的系统理论;
- 五、以社会科学为背景的系统理论;
- 六、以哲学为背景的系统理论。

F.1 以生物学和/或心理学为背景的系统理论

系统理论在科学上的兴起首先是在生物学领域,而一些心理学家也较早地投入系统理论研究。这里介绍贝塔朗菲、米勒和艾根的工作。

F.1.1 贝塔朗菲的一般系统理论

贝塔朗菲是现代理论生物学家、一般系统理论的主要创始人。他早在 20 世纪 20 年代提出机体生物学(亦称机体系统理论),1932 年发表《理论生物学》一书,系统阐述了他的机体生物学。1937 年首先从口头上提出一般系统理论的基本思想。1945 年发表“关于一般系统理论”一文。1947 年,在维也纳大学的一次讲课中简要地介绍了他倡导多年的一般系统理论。1949 年,重新发表“关于一般系统理论”一文,并在《生命问题》一书中概括地论述一般系统理论。1950 年在《科学》杂志上发表“物理学和生物学中的开放系统理论”一文。1954 年,与合作者们一起创办一般系统理论学会(后改称一般系统研究会,现称为国际系统科学学会)。从 1956 年起与拉波波特一起主编《一般系统》年鉴,直至 1972 年逝世。1967 年发表《机器人、人与脑》一书,1968 年发表《机体心理学与系统理论》。他在系统理论研究中的代表作是 1968 年出版的《一般系统理论》一书。他关于一般系统理论的最后一篇重要论文是“一般系统理论的历史和现状”(1971 年)。

在一般系统理论中,贝塔朗菲主要研究了三个方面的系统理论:

1) 机体系统理论

在批判机械论和活力论、提倡机体论的过程中,贝塔朗菲认为借助机体论,生物学可以从经验科学发展成为理论科学,从定性描述过渡到定量描述。他通过长期的实验研究和理论研究,在代谢、生长、形态发生、刺激—反应等领域,部分地揭示了生物体的定量规律。

2) 开放系统理论

从系统与环境的关系上,系统可分为封闭系统和开放系统;前者只是后者的一种近似,因此开放系统可当作系统的一般情形。这样,贝塔朗菲就集中研究开放系统。而研究开放系统,不能像经典力学和古典数学动力理论那样只考虑系统的状态,必须全面考虑系统的输入、输出和状态。正因为全面考虑了开放系统的这三个基本因素,贝塔朗菲较科学地解释了与开放系统有关的稳态、等终极性以及有序性的增加等问题。

3) 动态系统理论

从系统与时间的关系上,系统可分为静态系统和动态系统;前者只是后者的一种近似,从而动态系统可作为系统的一般情形。这样,贝塔朗菲着重研究动态系统。他在用一组联立微分方程

$$\frac{dQ_i}{dt} = f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \quad (\text{F. 1})$$

定义一个动态系统的基础上,通过设定各种约束条件,从数学上描述了系统的各种性质,如整体性、加和性、竞争性、机械化、集中化、终极性、等终极性等。

贝塔朗菲在把“系统”一词确立为科学术语,深入研究一般系统的基本性质,为一般系统理论建立概念框架的基础上,力求把一般系统理论的基本原理应用于物理学、生物学、心理学、精神病学和社会科学等领域,试图以一般系统理论为基础实现科学的统一,建立系统

哲学。

F.1.2 米勒的一般生命系统理论

米勒是心理学家、精神病学家和系统科学家,是一般生命系统理论的创始人。他早在 1949 年提出“行为科学”一词,在美国芝加哥大学开展以行为研究为中心的跨学科研究。1953 年,他与合作者一起发表关于行为科学中内稳态模型的最初研究成果。1955 年在《美国心理学家》杂志上发表论文讨论行为科学的一般理论。从 20 世纪 60 年代起,他使用“生命系统”概念并把自己的理论称为一般生命系统理论(简称生命系统理论)。在 60 年代和 70 年代,他发表大量论文,阐述了生命系统理论的基本概念与原理,其中包括他自己关于生命系统中信息超载现象的实验研究。在所有这些研究的基础上,1978 年发表生命系统理论的经典著作《生命系统》,为生命系统理论建立了较完整的体系。

在生命系统理论中,“生命系统”一词是指一切活着的具体系统,包括生物系统和社会系统。生命系统理论是关于一切生命系统的一种一般理论,它既不同于生物科学的各分支学科,也不同于社会科学的各分支学科,它要揭示的是适用于生物系统和社会系统的统一原理。

生命系统理论的基本点是:各层次上的各种生命系统都是由一系列分系统构成的开放系统,这些分系统为了生命系统的生存和进化发展,以各种方式处理物质、能量与信息的输入、流通与输出。

米勒把从阿米巴到联合国、从细胞到超国家系统的各种生命系统分成八个层次:细胞、器官、生物体、群体、组织、社区、社会、超国家系统。层次越低,系统就越简单,其平均规模越小,其起源时期越早;相反,层次越高,系统就越复杂,其平均规模越大,其起源时期越迟。

各层次的生命系统,为了生存和传宗接代必须进行 20 种关键性

过程。这些过程由 20 个关键分系统来承担。这样,任何生命系统基本上都含有 20 个关键分系统,这是生命系统中最重要的跨层次形式一致性。而生命系统具有跨层次形式一致性的根据在于从细胞到超国家系统的全部生命系统是从最简单的原始细胞通过逐步散裂而进化的产物。

生命系统的 20 个关键分系统分为下列三组:

1) 物能与信息处理分系统

共有二个。其中,边界对物能与信息的输入和输出进行过滤,保护系统免受或抵挡环境压力;复制器按照遗传指令或章程信息产生新一代系统。

2) 物能处理分系统

共有八个。摄取器为系统摄取所需物能。分配器将来自环境或其他分系统的物能分配给系统各组元。变换器把输入物能转变为能在系统内部使用的物能形式。生产器用系统的物能输入或变换器的物能输出制造出系统所需的新的物能形式。物能储备器为系统储备各种物能。排放器将物能产品和废弃物排出系统之外。驱动器使系统或组元相对于部分或全部环境发生移动。支持器使系统各组元保持适当空间关系,使得它们既可相互作用,又不至于相互挤压。

3) 信息处理分系统

共有十个。输入转换器把载有信息的信标带入系统,并把它们转换成可在系统内部传输的物能形式。内部转换器从系统内各分系统或组元接收载有有关其状况信息的信标,把它们转变成可在系统内部传输的物能形式。信道与信息网把信息传送到系统各部分,又从系统各部分获取信息。解码器把系统输入信息的公用码转变成可在系统内部使用的专用码。联系器执行学习过程的第一步骤,在系统内部信息单元之间建立持续联系。存储器执行学习过程的第二步

骤,在不同时间阶段存贮各种信息。计时器通过信道与信息网接收输入信息与内部信息,使系统保持时间上的定向。决策器是重要的分系统,它从所有其他分系统接收信息并向它们传输控制整个系统的信息输出。编码器把来自其他信息处理分系统的系统专用码改变为环境中的其他系统所能理解的公用码。输出转换器把系统内的信标改变为可在环境信道上传输的其他物能形式。

米勒根据生命系统分成八个层次、每个层次都含有 20 个分系统这一事实,设计出生命系统的层次—分系统表。该表共有 160 个格,每个格都可填写相应的分系统组元。米勒已填上其中的 153 个格,还有七个未知格。

在理论方面,米勒所要揭示的是适用于把生物界和人类社会包括在内的整个生命系统的系统规律。他为生命系统从细胞到超国家系统的整个发展过程给出一个理论框架,为解决生命世界的统一性问题提供了一种发人深省的方案。

在应用方面,米勒所提出的用一般生命系统理论解决或研究某个生命系统问题的基本战略是:弄清该系统的层次,找出它的 20 个分系统,画出该系统的结构—过程图,表示物能与信息的输入、流通与输出,找出并处理物能与信息调节过程中存在的问题。

F.1.3 艾根的超循环理论

艾根是物理化学家,研究高速化学反应取得突出成果,1967 年获诺贝尔化学奖。他于 1971 年提出超循环理论,1977 年发表《超循环——自然界的一个自组织原理》一文,系统地阐述了超循环理论。这一理论属于分子生物学及分子生物物理学领域。

1) 生命进化的三个阶段

艾根认为,在逻辑上可以把进化分为在时间上并非截然分开的三个时期:第一是前生物的化学进化阶段,在这一阶段,无机分子逐

步进化为简单有机分子,简单有机分子又逐步进化为复杂的有机分子,最后产生核酸和蛋白质;第二是生物大分子的自组织阶段,即从无生命到生命的进化阶段,在这一阶段,通过核酸和蛋白质的相互作用最终产生最早的原生细胞;第三是达尔文生物进化阶段,在这一阶段,原生细胞逐步进化而产生各种生物种。奥巴林(Aleksandr Ivanovich Oparin, 1894—1980)已在原则上解决了从无机物到有机物的进化问题,而达尔文及现代达尔文主义者已从原则上解决了物种进化问题。艾根所提出并要解决的是从无生命到生命的进化即从生物大分子到原生细胞的进化问题。为此,艾根引入所谓“超循环”概念。

2) 循环的三个等级

艾根把从无生命到生命的进化过程中的循环反应网络分成三个等级,如图 F. 1 所示。

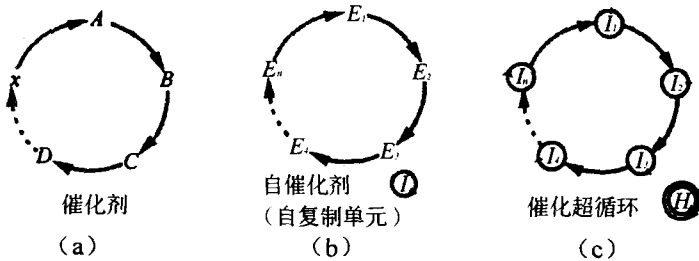
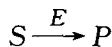


图 F. 1 循环反应网络的三个等级

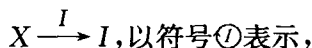
第一等级是反应循环。在一组相互关联的反应中,如果任一产物与前面某一步骤中的反应物相同,就形成一个反应循环,而反应循环作为整体就成为一个催化剂,如图 F. 1(a)所示。在最简单的情形中,酶就是这样的催化剂。它使底物 S 转化为产物 P :



这一反应的实际过程是,酶 E 与 S 先结合成 ES , ES 再转变成

EP , EP 又释放出 P 和 E , 而 E 再与 S 结合, 以此构成反应循环。

第二等级是催化循环。如果一个反应循环中至少有一个中间物 (也可以是全部中间物) 是催化剂, 就形成一个催化循环。如在图 F. 1(b) 中, E_i 是 E_{i+1} 的催化剂, 而循环 $E_1 \rightarrow \dots \rightarrow E_n \rightarrow E_1$ 作为整体就是一个自催化。催化循环可表示为



其中 X 为富能原料。最简单的催化循环作为一个自复制单元, 能自我保存信息。单链 RNA 的复制, 是生物学上一个重要的催化循环。正链 RNA 可以作为模板, 指导负链 RNA 的合成, 而负链 RNA 也可以作为模板, 指导正链 RNA 的合成。双链 DNA 的自复制是一个在生物学上典型的催化循环。

第三等级是催化超循环。严格地从字面上说, 自催化系统已可称为超循环系统, 因为自催化系统是催化循环, 而催化剂本身是反应循环。但在艾根的理论中, 所谓超循环是指关于催化功能是超循环的系统, 即催化超循环。因此, 催化超循环是以循环联系连接各个自催化剂或自复制单元而形成的。如在图 F. 1(c) 中, 各中间物本身是自复制单元。其中各个 I_i 具有双重循环功能, 它既能指导自己的复制, 又能为下一个中间物的产生提供催化支持。例如, 在 DNA 噬菌体感染细菌细胞的反应中就包含一个超循环过程, 可简化表示为 $\textcircled{I} \rightarrow E$ 。

3) 生物大分子的自组织: 代谢、自复制、突变

艾根进一步考虑生物大分子的自组织过程。他认为, 从生物大分子水平上看, 选择与进化的基础是代谢、自复制和突变。代谢是生命现象的一个基本特征, 选择只有对处于代谢过程中的分子种才有意义。

自复制是为保存信息所必需的, 非耦合的自复制单元已可以保

证从一代传至下一代的有限信息量的保存。而超循环是确保功能上相关联的一些自复制单元所能共存的最简单的实际分子组织,是使可以自复制的功能联系能够进化的最简单系统。它能够从一个自复制单元和它的突变种中,亦即从一个单一(分子)拟种中起源。无论何时何地,只要自然界所设置的环境条件许可,它的出现是不可避免的,并且一旦建立就永存下去。

突变是在自复制过程中出现的。“复制错误”会产生新的信息,产生新的突变种,从而破坏原先的稳定分布,导致不稳定,而新的稳定形式只有在这种不稳定性基础上才能建立起来。

4) 超循环进化原理的数学模型

艾根为生物大分子的进化原理提出了数学模型:

$$\dot{x}_i = (A_i Q_i - D_i) x_i + \sum_{k \neq i} v_{ik} x_k + \Phi_i \quad (\text{F. 2})$$

其中, $i = 1, 2, \dots, n$, 是程序指标, 取决于一切可辨别的自复制分子单元, 从而表征它们的特殊遗传信息; x_i 是分子种 i 的种群量; A_i $Q_i x_i$ 表示种 i 以自己为模板的合成速率; $-D_i x_i$ 为分解速率; Q_i 表示种 i 正确复制的比例, 取 0 与 1 之间的值; $v_{ik} x_k (k \neq i)$ 表示由种 k 的错误拷贝产生种 i 的速率; 流 $\Phi_i = \Phi_i x_i / \sum_k x_k$, 调节总流 Φ_i 可使 $\sum_k x_k = c$ (常数)。通过对此方程的讨论, 艾根认为选择的对象不是单一的分子种, 而是拟种, 即按一定概率分布组织起来的一些关系较密切的分子种的组合。

艾根用图 F. 2 与图 F. 3 说明超循环的进化原理。在图 F. 2 中, 对它们自己的复制酶 E_1 和 E_2 进行编码的两个突变种基因 I_1 和 I_2 可能由于它们的密切亲缘关系而对自强化[11, 22]和互强化[21, 12]显示出等价偶联。但是, 在通常情况下两个蛋白质与两个突变种基因的偶联强度会有所差别。在图 F. 3 中用线条的粗细表示这些差别, 其中粗线表示偶联中的偏爱(不管它可能是多么小)。这里有四种情况:

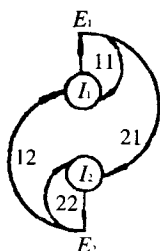


图 F.2 突变种基因
 I_1 和 I_2 的等价偶联

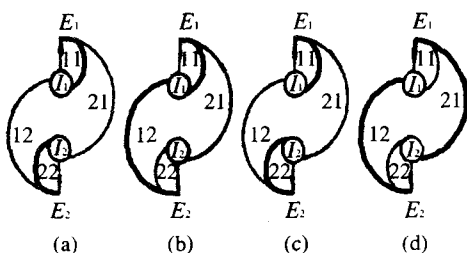


图 F.3 超循环的进化原理

(a) E_1 偏爱 I_1 , E_2 偏爱 I_2 。结果, I_1 和 I_2 分别被它们各自的酶以超循环方式强化, 从而导致激烈的竞争。即使这两者在选择上等价时也由于微小涨落的影响而只有一个突变种生存下来。

(b) E_1 和 E_2 都偏爱 I_1 。结果, I_1 在竞争中取胜, I_2 消亡。

(c) E_1 和 E_2 都偏爱 I_2 。结果, I_2 在竞争中取胜, I_1 消亡。

(d) E_1 偏爱 I_2 , E_2 偏爱 I_1 。结果, I_1 和 I_2 通过超循环联系而稳定地共存。可见, 一个稳定的二元超循环要求对互强化的偏爱。

艾根用不动点分析方法, 为这里的二元超循环的形成给出精确判据。他利用简化的速率方程

$$\dot{x}_i = \sum_{k=1,2} k_{ik} x_i x_k - \frac{x_i}{c} \sum_{i=1,2} \sum_{m=1,2} k_{im} x_i x_m \quad (F.3)$$

得出三个不动点和它们的本征值:

$$\bar{x}_1 = (c, 0); \omega^{(1)} = (k_{21} - k_{11})c \quad (F.4)$$

$$\bar{x}_2 = (0, c); \omega^{(2)} = (k_{12} - k_{22})c \quad (F.5)$$

$$\bar{x}_3 = (k_{22} - k_{12}, k_{11} - k_{21}) \frac{c}{k_{11} - k_{21} + k_{22} - k_{12}}; \quad (F.6)$$

$$\omega^{(3)} = \frac{(k_{11} - k_{21})(k_{22} - k_{12})}{(k_{11} - k_{21}) + k_{22} - k_{12}} c \quad (F.7)$$

可以得出与上面所说的四种情况相一致的结果:

- (a) $k_{11} > k_{21}; k_{22} > k_{12}$, I_1 和 I_2 相互竞争;
- (b) $k_{11} > k_{21}; k_{22} < k_{12}$, I_1 被选择;
- (c) $k_{11} < k_{21}; k_{22} > k_{12}$, I_2 被选择;
- (d) $k_{11} < k_{21}; k_{22} < k_{12}$, I_1 和 I_2 的超循环稳定。

这些结果还可以推广到多元超循环中去。这样,我们就可以知道,无论在什么时候,只要各组元之间出现对互强化的偏爱,就能从一个单一的拟种中产生超循环组织。并且这个超循环组织可以向更复杂的超循环组织发展,例如从 n 元超循环组织发展到 $(n+1)$ 元超循环组织。

最后,艾根用自己所构造的超循环进化原理为从无生命到生命的进化过程建立了理论模型。在这个模型中,由核酸和蛋白质组成的超循环组织逐步发展成原生细胞,而那以后的进化则由现代达尔文主义来解释。

F.2 以物理学为背景的系统理论

物理学研究随着从孤立系统发展到开放系统,从平衡态发展到非平衡态,从线性系统发展到非线性系统,产生了一些以物理学为背景的研究复杂系统运动规律的系统理论。这里,我们介绍普里戈金、哈肯与槌田敦的工作。

F.2.1 普里戈金的耗散结构理论

普里戈金是热力学领域比利时布鲁塞尔学派领导人,物理化学家。1945年提出最小熵产生原理,1969年在第一次国际“理论物理与生物学”会议上发表的“结构、耗散与生命”一文中提出了耗散结构理论。20世纪70年代后,这一理论产生了广泛影响。他于1977年获诺贝尔化学奖。

所谓耗散结构,是一个远离平衡的开放系统非线性反常涨落作用下形成的稳定有序的动态结构。即是说,耗散结构的产生和进化需要三个条件。其一,系统必须是开放的,即是说,系统如不与环境进行物能交换,就不能形成耗散结构;其二,系统必须保持远离平衡,在平衡区与近平衡的线性区不能出现耗散结构;其三,耗散结构是来自非线性反常涨落的有序结构。

普里戈金从热力学第二定律出发,以局域平衡假设为基本,运用李亚普诺夫稳定性理论、爱因斯坦涨落理论、分叉理论和随机理论,研究耗散结构的性质及它的形成、稳定和进化的规律。

耗散结构理论的基本思想和方法可简述如下。

1) 开放系统的熵原理

一个开放系统在时间间隔 dt 内熵 S 的变化 dS 由两个部分组成:

$$dS = d_e S + d_i S \quad (F.8)$$

其中, $d_e S$ 是因系统与环境交换物能而引起的熵流,可正可负可零; $d_i S$ 是因系统内部的可逆或不可逆过程而引起的熵产生,可正可零,即

$$d_i S = 0 \quad (\text{可逆过程})$$

$$d_i S > 0 \quad (\text{不可逆过程})$$

在孤立系中

$$d_e S = 0$$

$$dS = d_i S \geq 0$$

在开放系中,如果

$$d_e S < -d_i S$$

则

$$dS < 0$$

2) 局域平衡假设

这个假设是为了在非平衡态研究中使用平衡态热力学概念和原

理而提出来的。这个假设的基本思想是,对于一个在整体上处于非平衡的系统,设定它的各个部分都处于平衡。具体地说,对于一个非平衡系统,设定:

- (1) 该系统由大量或无限多个体积元(即局域)组成;
- (2) 该系统每个体积元都处于平衡态;
- (3) 该系统每个体积元所含微观粒子数足够多,能满足统计处理的要求。

在局域平衡假设之下,在各局域的研究中就可使用平衡态热力学中的热力学变量,如压力、温度、熵等,还可用平衡态热力学的公式和函数来表示这些变量之间的关系。

下一步的关键是如何处理各局域之间的关系。大致上,根据系统的内含变量在各局域的边界是否连续,可分为“非连续系”和“连续系”。耗散结构理论所研究的是“连续系”。一根金属线在一端加热而在另一端冷却,或者由扩散形成的混合物,属于“连续系”。其中,内含变量不仅是时间的连续函数,而且是空间坐标的连续函数。

有了上述的假设和限制(准确地说,还需要其他限制条件),就可利用平衡态热力学和连续介质力学等方面的既有知识,写出非平衡系统中的有关方程。

(1) 连续性方程

在非平衡系统中,一切状态变量是时间和空间位置的函数。在连续系中,对于任何守恒量,其流量 J 的散度 $\text{div } j$ 和密度 ρ 对时间的导数有下列关系:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div } j \quad (\text{F. 9})$$

在直角坐标系中,散度的显式为

$$\text{div } j = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} \quad (\text{F. 10})$$

(2) 质量守恒方程(反应扩散方程)

如果系统内除了扩散类反应外,还有化学类反应,那么,

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -\operatorname{div} j_i + \sum_{j=1}^n v_{ij} w_j \quad (\text{F. 11})$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = D \nabla^2 \rho_i + \sum_{j=1}^n v_{ij} w_j \quad (\text{F. 12})$$

亦可写成

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = D_i \nabla^2 \rho_i + f_i(\{\rho_i\}) \quad (\text{F. 13})$$

在上述方程中, ρ_i 为第 i 种组分的质量密度; D_i 为第 i 种组分的扩散系数; v_{ij} 为第 i 种组分在第 j 种化学反应中的化学计量系数, w_j 为第 j 种化学反应的反应率; 拉普拉斯算符 ∇^2 为

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (\text{F. 14})$$

(3) 熵守恒方程

对于局域熵 S_v , 写出守恒方程:

$$\frac{\partial S_v}{\partial t} = \operatorname{div} j_s + \sigma \quad (\text{F. 15})$$

其中, j_s 是熵流, 由扩散类反应引起; σ 为局域熵产生, 由化学类反应引起。熵是广延量, 具有可加性, 对上式积分, 可得总熵对时间的微分 dS/dt :

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} \int S_v dv = - \int \operatorname{div} j_s dv + \int \sigma dv \\ &= \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt} \end{aligned} \quad (\text{F. 16})$$

3) 平衡态、近平衡态、远离平衡态及其稳定性问题

在非平衡系统中, 存在着热力学力(如密度梯度、温度梯度、化学亲和势、电势梯度等)和热力学力产生的热力学流(如粒子流、热流、

化学反应率、电流等)。现在用 J_k 表示第 k 种不可逆过程的流, 用 X_l 表示第 l 种不可逆过程的力, 则可以认为 J_k 是 X_l 的函数:

$$J_k = J_k(\{X_l\}) \quad (\text{F. 17})$$

以平衡态作为参考态, 作泰勒展开, 得

$$\begin{aligned} J_k(\{X_l\}) &= J_k(\{X_{l,0}\}) + \sum_l \left(\frac{\partial J_k}{\partial X_l} \right)_0 X_l \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{l,m} \left(\frac{\partial^2 J_k}{\partial X_l \partial X_m} \right) X_l X_m + \dots \end{aligned} \quad (\text{F. 18})$$

在平衡区, 力和流皆为零, 只剩下上式右边的第一项, 即

$$J_k(\{X_{l,0}\}) = 0 \quad (\text{F. 19})$$

在近平衡区, 二次以上的项都可忽略, 只保留线性项, 得

$$J_k = \sum_l L_{kl} X_l \quad (\text{F. 20})$$

其中,

$$L_{kl} = \left(\frac{\partial J_k}{\partial X_l} \right)_0 \quad (\text{F. 21})$$

可见, 在近平衡区, 流和力的关系是线性的, 称之为线性平衡区。

在远离平衡区, 力和流超过一定值, 至少必须保留到二次项。这样, 系统就处在非线性非平衡区。

为了考察系统在这三个区域能否稳定, 将熵 S 和熵产生 P 以定态为参考态展开, 得

$$S = S_0 + \delta S + \frac{1}{2} \delta^2 S + \dots \quad (\text{F. 22})$$

$$P = P_0 + \delta P + \frac{1}{2} \delta^2 P + \dots \quad (\text{F. 23})$$

还考虑到局域熵产生 σ 为

$$\sigma = \sum_k J_k X_k \quad (\text{F. 24})$$

并利用李亚普诺夫稳定性理论, 就可知道:

对于平衡区,李亚普诺夫函数是熵 S , 因

$$S > 0 \quad (\text{F. 25})$$

$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad (\text{F. 26})$$

所以定态(即平衡态)是稳定的。

对于线性非平衡区,李亚普诺夫函数是熵产生 P , 因

$$P \geq 0 \quad (\text{F. 27})$$

$$\frac{dP}{dt} \leq 0 \quad (\text{最小熵产生原理}) \quad (\text{F. 28})$$

所以定态是渐近稳定的。这表明在线性非平衡区不可能产生新的有序结构, 见图 F. 4。

非线性非平衡区的情况很复杂。在这个区域, 熵并不具有极值行为, 最小熵产生原理也失效, 因此不能把熵 S 或熵产生 P 作为李亚普诺夫函数。但是, 在有关方程中边界条件与时间无关时, 可证明

$$\delta^2 S \leq 0 \quad (\text{F. 29})$$

及

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \delta^2 S \right) = \delta_x P \quad (\text{F. 30})$$

这样, 超熵 $\delta^2 S$ 可以看作是一个李亚普诺夫函数, 并且将超熵产生 $\delta_x P$ 当作系统稳定性判据:

$\delta_x P > 0$	系统稳定
$\delta_x P < 0$	系统不稳定
$\delta_x P = 0$	临界稳定

这就表明, 当 $\delta_x P$ 由正变负时, 系统变得不稳定, 这时微小的涨落就可以驱使系统离开不稳定态, 进入一个新的稳定状态即有序的耗散结构。如在图 F. 5 中, 当 $\lambda < \lambda_c$ 时, 系统处在稳定态(a); 当 $\lambda = \lambda_c$ 时, 系统变得不稳定并发生分叉; 当 $\lambda > \lambda_c$ 时, 可观察到两个分支, (b)是不稳定分支, 而(c)是新的稳定分支, 表示耗散结构。

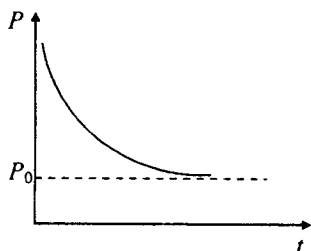
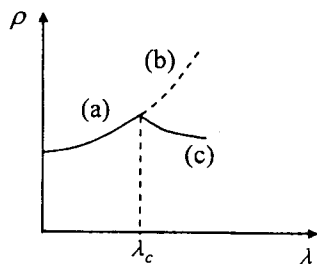
图 F.4 熵产生 P 随时间的变化

图 F.5 分叉与耗散结构的产生

除上述几点外,普里戈金等人还用随机理论研究涨落在耗散结构形成和进化中的作用,并且在讨论非线性系统的解时还广泛采用了分叉理论。

耗散结构理论在物理和化学领域成功地解释了在某些非线性非平衡系统中出现的自组织现象。这就为远离平衡系统的研究奠定了一定的基础。后来,普里戈金等人将耗散结构理论推广到很多非热力学领域,如社会、文化、历史等。但是,就目前研究情况而言,耗散结构理论方案仅仅适用于描述缓慢变化的非平衡连续系统。

F.2.2 哈肯的协同学

哈肯作为一个数学家和物理学家,在数学和物理学的广泛领域作出了贡献。在 20 世纪 60 年代,他提出激光理论。以此为背景,他于 1970 年在斯图加特大学的演讲中首次引入“协同学”一词,1971 年与格雷厄姆(Robert Graham)一起发表“协同学:一门协作的学说”一文,正式宣告协同学的诞生。之后,他发表协同学方面大量论文和著作,使协同学在全世界范围内产生了很大影响。

协同学(Synergetics)一词来自表示许多要素之联合作用的希腊语(sun-, syn- [together] + ergon [work] $\Rightarrow$ sunergos $\Rightarrow$ synergy [working together])。在截然不同的各种类型复杂系统中,要素之

间的联合作用超出各要素自身的模式,产生整个系统的统一宏观模式。这一过程被称为协同过程。哈肯在协同学中研究这种协同过程,为各种类型系统从无序到有序的自组织转变建立了一套数学模型和处理方案。

协同学的基本思路和方法可简述如下:

1) 主方程、序参量、役使原理

协同学以无规行走作为随机过程的典型,讨论主方程的各种结果,主方程可表示为

$$\begin{aligned}\dot{P}(m, t) &= \text{入率} - \text{出率} \\ &= \sum_{m'} w(m, m') P(m', t) \\ &= P(m, t) \sum_{m'} w(m', m)\end{aligned}\quad (\text{F. 31})$$

式中, m, m' 表示粒子在时刻 t 和 t' 时的位置, w 表示跃迁概率。此式表示该系统在 t 时刻处于 m 点的概率由于 m' 点到该点的跃迁而增加,并由于离开该点的跃迁而减少。主方程是表示系统概率分布随时间变化的确定性方程,而概率分布正是在随机过程中表示宏观量的基础,所以主方程能有效地描述由大量无规行走要素(或子系统)构成的系统随时间变化的规律。

为表示序的不同状况即系统的宏观有序度,哈肯采用朗道最先引入的用来处理结构相变的序参量概念。序参量表示系统宏观模式的有序度。在不同系统中,序参量有不同的意义。例如,在铁磁体磁化过程中,序参量表示总磁化强度;在激光系统中,序参量表示光场强度;在化学反应中,序参量表示粒子数或浓度。序参量大,则系统的宏观有序度高;序参量小,则系统的宏观有序度小;当系统处于完全无序时,其序参量为零。在一个宏观无序的系统中,随着外界条件的变化,序参量也发生变化,当系统达到临界点时序参量急剧增大到最大值,从而形成一个宏观有序结构。

为求得序参量,运用绝热消去法消去序参量所遵从的主方程中的阻尼的快弛豫参量,余留的是无阻尼的慢弛豫参量,它就成为主宰系统变化的序参量。也就是说,当许多复杂系统通过不稳定性而自发形成空间结构、时间结构或时空结构时,在不稳定点附近,系统的动力学和突现结构通常由一个或少数几个集体变量即所谓序参量决定,而系统其他变量的行为则由这些序参量(和随机力)决定。这就是所谓役使原理(亦称伺服原理、支配原理)。有时,主方程经绝热消去处理后仍然含有若干个序参量,那么这些序参量之间发生激烈竞争,结果或者一个序参量获胜而独自规定系统宏观结构,或者几个序参量共同规定系统宏观结构。即是说,系统从无序到有序的进化过程取决于序参量之间的竞争与协同;最后究竟出现何种结构,要取决于序参量方程、初始条件和涨落。

2) 数学描述方案

贝塔朗菲在一般系统理论中曾经指出:如果 Q_i 的变化是 Q_i 的任一函数 F_i ,并在空间坐标中取导数,那么当

$$\frac{\partial F_i}{\partial Q_s} \gg \frac{\partial F_i}{\partial Q_j}, j \neq s \text{ 或 } \frac{\partial F_i}{\partial Q_j} = 0 \quad (\text{F. 32})$$

时, Q_s 是系统的主导部分或支配部分。这时,要素 Q_s 起主导作用,决定整个系统的行为。

在协同学中,哈肯用役使原理将贝塔朗菲的想法具体化了。通过适当的坐标变换,可将贝塔朗菲所研究过的方程组(见式(F. 1))改写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_1 &= -\lambda_1 q_1 + R_1(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ \dot{q}_2 &= -\lambda_2 q_2 + R_2(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ &\vdots \\ \dot{q}_n &= -\lambda_n q_n + R_n(q_1, q_2, \dots, q_n) \end{aligned} \right\} (n=1, 2, \dots, n) \quad (\text{F. 33})$$

根据 λ 取正号还是负号,可将下标分为两组: $s=1, 2, \dots, m; i=m+$

1, m+2, ..., n。由此可将上述方程组分为下列两组:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_1 &= -\lambda_1 q_1 + R_1(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ &\vdots \\ \dot{q}_m &= -\lambda_m q_m + R_m(q_1, q_2, \dots, q_n) \end{aligned} \right\} (\lambda \leq 0) \quad (\text{F. 34})$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_{m+1} &= -\lambda_{m+1} q_{m+1} + R_{m+1}(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ &\vdots \\ \dot{q}_n &= -\lambda_n q_n + R_n(q_1, q_2, \dots, q_n) \end{aligned} \right\} (\lambda > 0) \quad (\text{F. 35})$$

这时,所谓绝热近似是指当 λ 足够大, q 急剧衰减时,可以使广义“速度” $\dot{q}$ 等于零。设 q_i 小于 q_s , 那么在 R_s 中, 就可以令 $q_i = 0$ 。又令 $\dot{q}_{m+1}, \dots, \dot{q}_n = 0$, 可将方程组(F. 35)写成

$$\left. \begin{aligned} q_{m+1} &= R_{m+1}(q_1, q_2, \dots, q_n) / \lambda_{m+1} = q_{m+1}(s) \\ &\vdots \\ q_n &= R_n(q_1, q_2, \dots, q_n) / \lambda_n = q_n(s) \end{aligned} \right\} \quad (\text{F. 36})$$

方程组(F. 36)的解由 q_s 决定。将(F. 36)代入(F. 34), 就得只由 q_s 组成的方程组(F. 37):

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_1 &= -\lambda_1 q_1 + R_1(q_1, q_2, \dots, q_m; q_{m+1}(s), \dots, q_n(s)) \\ &\vdots \\ \dot{q}_m &= -\lambda_m q_m + R_m(q_1, q_2, \dots, q_m; q_{m+1}(s), \dots, q_n(s)) \end{aligned} \right\} \quad (\text{F. 37})$$

方程组(F. 37)的解决定各要素(子系统)的非零行为是否可能。这时,称 q_i 的行为被 q_s 役使。由此可知,变量组 $q_i (= q_{m+1}, \dots, q_n)$ 分别以相同的形式含有变量组 $q_s (= q_1, \dots, q_m)$ 的各分量。 q_s 决定着 q_i 的行为,因而被看作是序参量。序参量 $q_s (= q_1, \dots, q_m)$ 是取决于全部的 $q_1, \dots, q_n$ 的变量,但是其数目小于 n 。这样,原来由大量要素组成的复杂系统就简化为可用少数几个序参量描述的系统。

现在,协同学广泛用来解释在各种不同类型系统(如物理、生物、社会、认知系统等)中出现的无序—有序、有序—有序、有序—混沌转变过程。

F.2.3 槌田敦的资源物理学

槌田敦是日本物理学家。他于1976年在《日本物理学会志》上发表“聚变核电的限界和资源物理学”一文,阐明再生资源的使用条件,创立了资源物理学。之后,槌田敦及其合作者发表大量论文和著作,进一步充实和发展了资源物理学。

槌田敦认为,在科学技术发展的当前阶段,综合比分析重要,归纳比演绎重要。他吸取古希腊人关于“流”的辩证思想,认为以“流”为主线可以建立适用于自然界和人类社会的统一的科学理论。他指出:资源的导入、资源的消费以至废物废热的排出这一完整的“流”乃是社会、经济和生物等定常开放系赖以存在和运动的动力。

研究资源物理学的基本手段是熵,基本原理是热力学第二定律。他认为,所谓熵是表示物和能的扩散程度的指标,是物和能本身的属性,而物和能的扩散能力是世上一切变化和活动的基础,也就是一切“流”的基础。熵既是状态量,又是迁移量。如要测量作为状态量的熵,生命过程就要停止,生命系统就要瓦解。所以研究生命系统,必须采用作为迁移量的熵,在物流和能流中考察熵流。

资源物理学主要研究生命系统,而生命系统是一种定常开放系。在一定时间范围内,“流”不发生变化的系统称为定常开放系,它的存在条件是,

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad M_{\text{输入}} &= M_{\text{输出}}; \\ (2) \quad E_{\text{输入}} &= E_{\text{输出}}; \\ (3) \quad S_{\text{输入}} &< S_{\text{输出}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{F. 38})$$

其中 M 为物质, E 为能, S 为熵。

并且,一个较小的定常开放系只有在大于它的定常开放系中才能持续生存。

定常开放系分为单纯扩散系和循环系,前者如稳定的水流、热传

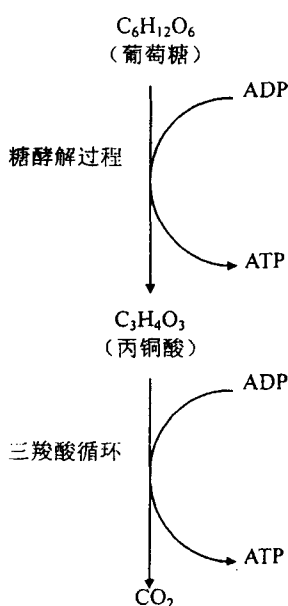


图 F.6 生物:葡萄糖的
氧化过程

导,后者如生命系、热机。在循环系中,构成总循环的所有元循环都是不可逆过程,当一个元循环完成时就会产生一些多余熵,它就把这些熵转移到其他元循环中去,最后把整个系统的多余熵排除到系统之外,以继续维持系统的总循环。循环系的维持依赖于各元循环之间良好的协调。对生命系来说,各元循环之间的良好协调意味着健康状态,互不协调就会导致疾病,而各元循环的停止就意味着死亡。

在循环系中,那些能积极地自主地选择特定路径来消耗资源的扩散能力,以维持内部循环的称为生命系。例如,葡萄糖的扩散能力终究要转化为二氧化碳、水蒸气的废热熵。但是这一“流”有各种各样的路径,而生物根据自己的需要把一个分子的葡萄糖转变为 38 个分子的 ATP(三

磷酸腺苷),如图 F.6 所示。

下面,将槌田敦关于地球热机、光合作用、资源问题、经济问题的基本观点简述一下。

1) 地球热机

地球在能量方面是开放的,但在物质方面基本上是封闭的。在地球上由于各种自然变化、生物的活动和人类社会的生产活动(包括物质生产和人类自身的生产),产生大量的热熵和物熵。地球只有成功地处理这些熵,才能维持定常性。槌田敦认为,地球作为一台热机,在大气循环和水循环中处理热熵,在生物循环中处理物熵,以此维持生态系的定常性。

大气循环:空气有受热膨胀的性质。空气从地表吸热而上升,到了大气上空向外层空间放热,冷却的空气就下降,再吸收热量而上升。这样,地球在大气的吸热→上升→放热→下降→吸热这样的循环中将一部分热熵排放到外层空间。

水循环:在地表上有大量的水。水吸热就蒸发。水蒸气比空气轻,含有水蒸气的空气就成为上升气流。由于大气上空的温度很低,将发生结冰、结露现象。冰晶和(或)水滴聚合成云,最后水以雨或雪的形式返回到地表。在水循环中,水蒸气在大气上空通过低温放热而变成冰晶或水滴时,排放另一部分热熵。

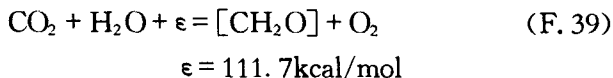
通常,水循环和大气循环结合在一起,将地表上的多余热熵排放到外层空间。

生物循环:地球处理物熵的方式,一是将含有物熵的雨水和河水排放到大海中去,另一是生物循环。但是,海水也是有限的,因此更重要的是生物循环。地球上的生物包括动物、植物和微生物,它们之间有敌对共生关系。植物可成为动物的食物,动物的粪便和动植物的残体经过微生物的分解作用,可转化为植物的养料。动物所排放的二氧化碳被植物用于光合作用,而光合作用中产生的氧气被动物用于呼吸作用。在这整个生物循环过程中,物熵转化为热熵。这些热熵进入大气循环和水循环,最终被排放到外层空间。显然,土壤和水支持着生物循环。

从上可知,一切破坏水循环、大气循环和生物循环的作法,将导致生态系的恶化,破坏生态系的定常性,最终将导致生命系的溃散。

2) 光合作用

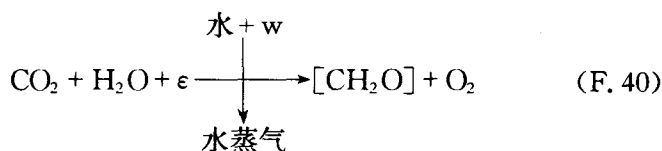
光合作用通常被视作为一种奇特的现象,因为:当光合作用反应式写成



时,反应前后的熵平衡关系为

左边	右边
CO ₂ 67.2	[CH ₂ O] 8.5
H ₂ O(l) 16.7	O ₂ 49.0
计 83.9	计 57.5

也就是说,这是一个熵减小的过程,因而不可能发生的。这表明用表示物质平衡和能量平衡的化学计量理论的反应式无法直接表示实际的反应过程。这样,有必要采用熵理论反应式,将光合作用反应式写成:



其中, w 表示为强制推进光合作用所需的 ϵ 之外的光;水通过蒸发排出光热转变中产生的熵。当利用单色光进行光合作用时,所需的额外光 $w = 238\text{kcal}$ 。熵平衡关系为:

左边	右边
CO ₂ 67.2	[CH ₂ O] 8.5
($n+1$)H ₂ O(l) 399.1	O ₂ 49.0
计 466.3	$n\text{H}_2\text{O(g)}$ 1032.8
	计 1090.3

可见,光合作用也是一个熵增加的过程。为了排除热熵,大多数植物依赖于水的蒸发。葡萄糖与其说是光制品,不如说是水制品。

3) 资源问题

对生命系(尤其对人类社会)来说,资源问题是一个基本问题。一个生命系为了维持其定常性和循环,必须有资源的输入和废物废热的排出。人类使用资源,就是使用资源的对人类有用的使用价值。资源的使用价值具有多元性。例如木材,既可作为燃料,亦可作为建

筑材料。使用价值的多元性可在使用价值空间上表示。但是,大致上说,资源的使用价值可分为扩散能力和保存能力,资源可分为原料资源和低熵资源。扩散能力是世界上一切活动的源泉,在经济活动中也是扩散能力起着主导作用,但是保存能力也很重要。一般来说,人们要求原料资源有较大的保存能力,而低熵资源有较大的扩散能力。

在生产过程中,原料资源转变为产品的基本物质构成,低熵资源(水、燃料)主要用于分离原料资源为产品和废物。水的作用特别重要。在一切生命系统和生态系统中,水是用来吸熵、排熵的最重要的低熵资源。一种物能能否用作低熵资源,需要进行认真的解释。分下列两种情况考察。

(1) 在热机中,能量(ϵ)和熵(σ)的平衡方程可写成:

$$\epsilon \text{ 平衡方程} \quad q_1 = w + q_2 \quad (\text{F. 41})$$

$$\sigma \text{ 平衡方程} \quad q_1/T_1 + \sigma' = q_2/T_2 \quad (\text{F. 42})$$

其中, T_1 和 q_1 分别表示高温热源的温度和热量, T_2 和 q_2 分别表示低温热源的温度和热量, w 表示所作的功, σ' 表示熵产生量。

从这两个方程中消去 q_2 , 得

$$w = w_0 - T_2 \sigma' \quad (\text{F. 43})$$

其中, w_0 表示用热量 q_1 所能作的最大功:

$$w_0 = q_1 (T_1 - T_2) / T_1 \quad (\text{F. 44})$$

w 除以 T_2 , 得

$$a = w/T_2 = \sigma_0 - \sigma' \quad (\text{F. 45})$$

其中, σ_0 表示热资源的扩散能力(或称热学使用价值):

$$\sigma_0 = w_0/T_2 = q_1 (1/T_1 - 1/T_2) \quad (\text{F. 46})$$

可以得出结论: 当 $a > 0$, 即 $\sigma_0 > \sigma'$ 时, 热机可以运转, 产生动力; 当 $a = 0$ 时, 热机无法运转; 在热机中, 不存在 $a < 0$ 的情形。 a 表示热机中热资源的利用可能性。

(2) 在热化学机(如内燃机)中,化学反应式可写成

$$A + B = C + D + w + q \quad (\text{F. 47})$$

这里, A, B 分别表示原料资源和低熵资源, C, D 分别表示产品和废物。将能量和熵的迁移量分别记为

$$\epsilon = (u + Pv) + w + q \quad (\text{F. 48})$$

$$\sigma = s + q/T \quad (\text{F. 49})$$

其中, u, s, v 表示系统输入输出物质的内能、熵和体积, P 为压力, w 为系统输入输出的功, 不包括与输入物和输出物的体积有关的输入功或输出功。

该热化学机工作过程中产生的熵为 σ' , 则

$$\epsilon \text{ 平衡方程} \quad u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2 + w + q_2 \quad (\text{F. 50})$$

$$\sigma \text{ 平衡方程} \quad s_1 + \sigma' = s_2 + q_2/T_2 \quad (\text{F. 51})$$

该系统输入端的压力 P_1 与输出端的压力 P_2 相等, 从这两个方程中消去热量 q_2 , 则

$$w = w_0 - T_2 \sigma' \quad (\text{F. 52})$$

其中, w_0 表示用资源所能作的最大功:

$$w_0 = -(\Delta u - T_2 \Delta s + P_2 \Delta v) \quad (\text{F. 53})$$

w 除以 T_2 , 得

$$a = w/T_2 = \sigma_0 - \sigma' \quad (\text{F. 54})$$

其中, 资源的扩散能力 σ_0 为

$$\sigma_0 = w_0/T_2 = q_0/T_2 + \Delta s \quad (\text{F. 55})$$

式中 q_0 表示在不做功的情况下资源的最大发热量。从 ϵ 平衡方程, 得

$$q_0 = -(\Delta u + P_2 \Delta v) \quad (\text{F. 56})$$

可见, 资源的扩散能力 σ_0 由两个部分组成, 第一项表示资源转化为热时发生的热熵增加量, 最大发热量除以环境温度而得, 第二项表示物熵增加量。可见, 资源的扩散能力可用热熵产生能力和物熵

产生能力之和来表示。

由此亦可结论说:与热机的情况一样,当 $a > 0$ 时,热化学机可以运转,产生动力。使之可能的是低熵资源。当 $a = 0$ 时,热化学机无法运转。当 $a < 0$ 时,所用资源可用作原料资源,但需要使用其他低熵资源。

在(1)和(2)的讨论中,资源的可利用性 a 表示为资源的扩散能力减去在使用这一资源时所产生的熵。但是,在使用这一资源后,会产生废物和废热。因此,必须采取某种措施来处理这些废物和废热。在这个过程中又要产生熵 σ'' 。所以,资源的可利用性应该表示为

$$a' = \sigma_0 - \sigma' - \sigma'' \quad (\text{F. 57})$$

也就是说,一种资源只有当 $a' > 0$ 时,才能使用。当 $a' \leq 0$ 时,如果 $a > 0$,那么这种资源虽然能用来驱使热化学机运转,但是将把含有 σ'' 的污染物留给后代人。

最后,资源根据它们能否自我更新,可分为可再生资源和非再生资源。地球是有限的,地球上的非再生资源也是有限的。因此人类必须合理控制非再生资源的消费。但是,从长远看,更重要的是合理使用可再生资源,来防止可再生资源转化为非再生资源,防止可再生资源总量的减少。在资源问题上,人类所面临的最大威胁乃是非再生能源的胡乱开发和使用正在加速破坏可再生资源的再生机制。真正的资源危机将不是非再生资源的枯竭,而是可再生资源的枯竭,是生态循环(大气循环、水循环、生物循环)遭受破坏。

4) 经济过程

保尔丁、乔治斯库-罗根等人曾经用熵概念和热力学第二定律研究过经济过程。槌田敦在资源物理学中也研究经济过程中的熵流。在槌田敦看来,经济过程可分为生产过程和消费过程。经济学上的消费相当于物理学上的扩散,即消耗产品的扩散能力的过程。因此,在生产过程中必须造出扩散能力大的产品。但是在生产过程

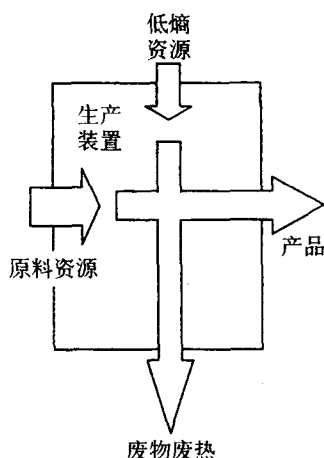


图 F.7 生产图

中,除了制造高度有序的低熵产品外,还以废物废热的形式向环境排出熵,如图 F.7 所示。如果不以低熵资源的扩散能力来排除原料资源中的熵和生产过程中发生的熵,就不可能进行生产。因此,生产过程作为一个整体,是扩散能力的消耗过程,即熵增加的过程。

植田敦将资源物理学看作是一种将热机、热化学机、生命系和生态系结合在一起的统一理论。它不仅对物理学、生物学、经济学和生态学的发展有重要的理论意义,而且为解决人类所面临的污染问题、资源问题和生态问题有

重要的实践意义。

F.3 以数学为背景的系统理论

以数学为背景的系统理论最初都是数学上的一般系统理论。数学上的一般系统理论是 20 世纪 60 年代以来最活跃的系统理论研究领域之一。早在 60 年代已形成三个流派,即梅萨洛维克体系、怀莫尔体系和克里尔体系。此外,突变论和分形几何学也非常引人注目。

F.3.1 梅萨洛维克体系

该体系又称公理化系统理论。在该体系中,(一般)系统被表示为抽象集上的关系,即

$$S \subset \times \{V_i | i \in I\}, \quad (F.58)$$

其中 $\times$ 为笛卡儿积, I 为指标集, V_i 为关系的各分量。当 I 为有限集

时,更常用的表达式为

$$S \subset V_1 \times V_2 \times \cdots \times V_n \quad (\text{F. 59})$$

关系 V_i 的分量被称为系统的客体。客体意味着用来描述系统的一个特征或一些特性;集 V_i 是用来表示各特征的两个或两个以上可选择方式的总体。这样,系统被看作是各客体状况的正常组合的总体。

梅萨洛维克据上述系统定义展开形式化体系。这里有两种基本方法。

1) 输入—输出方法

从各要素的输入—输出关系,通过各要素之间的关系而得出系统的输入—输出关系。若把各客体分成两个范畴即输入 X 和输出 Y ,则

$$S \subset X \times Y \quad (\text{F. 60})$$

其中,

$$X = \times \{V_i | i \in I_x\} \quad (\text{F. 61})$$

$$Y = \times \{V_i | i \in I_y\} \quad (\text{F. 62})$$

而 $\{I_x, I_y\}$ 是 I 的分拆。

2) 目标追求方法

用目标追求过程描述系统行为,即是说系统为追求任一给定的目标而对任意给定的刺激做出反应。例如,除 X 和 Y 外,又设有判定客体 M 和价值客体 V ,还设有结果(过程)函数

$$P: Y \times M \rightarrow Y \quad (\text{F. 63})$$

和性能函数

$$G: M \times Y \rightarrow V \quad (\text{F. 64})$$

令 V 的所有子集取极小值,则系统 $S \subset X \times Y$ 可用下列表达式定义:

对于任意 $x \in X, y \in Y$, 有 $(x, y) \in S$, 当且仅当存在 $m_x \in M$, 使

得对于所有 $m \in M$, 有

$$G(m_x, P(x, m_x)) \leq G(m, P(x, m)) \quad (\text{F. 65})$$

及

$$y = P(x, m_x) \quad (\text{F. 66})$$

换言之, 系统 $S \subset X \times Y$ 可定义为: 对于任意输入(刺激) $x \in X$, 系统有输出(反应) $y \in Y$, 以致当观察到由结果指定的一些约束时, 适当的性能函数取极小值。那么, 该系统的目标可示为 G 的极小化。

梅萨洛维克认为: 任何系统都可描述为输入—输出系统或目标追求系统; 据此, 可将许多相互冲突的方法, 如斯金纳 (Burrhus Frederic Skinner, 1904—1990) 的行为主义和乔姆斯基 (Noam Chomsky, 1928—) 的结构主义统一起来。

F.3.2 怀莫尔体系

怀莫尔把一般系统 Z 定义为集

$$Z = \{S, P, F, M, T, \sigma\}, \quad (\text{F. 67})$$

其中, S 与 P 为非空集, 分别表示状态集和输入状态集; F 为 P^R 的子集, 表示 Z 的输入函数集, 此处 $P^R = \{f | f: R \rightarrow P\}$, R 为实数集; $M \subset S^S$ 是 Z 的转移函数集, 且包含 S 上的恒等函数 ω ; $T \subset R$ 为时标; $\sigma: F \times T \rightarrow M(\text{上})$ 是系统状态转移函数。

对于给定的输入函数 $f \in F$ 、时间 $t \in T$ 、状态 $x \in S$, $\sigma(f, t)(x) \in S$ 被视为在给定初态 x 及输入函数 f 的情况下时刻 t 的系统状态。此外, σ 必须具备一些必要条件, 它们表示由“现实世界”系统支配的直观性质。即是说,

(1) “初态恒性”: 对于每一 $f \in F$,

$$\sigma(f, 0) = \omega \in M; \quad (\text{F. 68})$$

(2) “合成性质”: 若 $t_1, t_2 \in T$, 且 $t_1 + t_2 \in T$, 则对于每一输入函数 $f \in F$,

$$\sigma(f, t_1 + t_2) = \sigma(f \rightarrow t_1, t_2) \circ \sigma(f, t_1); \quad (\text{F. 69})$$

(3) “因果性”: 若 $\tau \in T, \tau \geq 0$, 且 $f, g \in F$, 使得 $f|_{[0, \tau)} = g|_{[0, \tau)}$, 则

$$\sigma(f, \tau) = \sigma(g, \tau) \quad (\text{F. 70})$$

类似地, 对于 $\tau < 0$ 及 $f|_{[\tau, 0)} = g|_{[\tau, 0)}$,

$$\sigma(f, \tau) = \sigma(g, \tau) \quad (\text{F. 71})$$

怀莫尔的一般系统模型不需要把“输出”作为必要项, 尽管输出或输出函数的存在是可以这样说明: 对于在任意非空集 Q 中取值的 Z , 将 Q 定义为输出集, 任意函数

$$\zeta: S \rightarrow Q \quad (\text{F. 72})$$

定义为输出函数。直观上系统 Z 可示为图 F. 8。

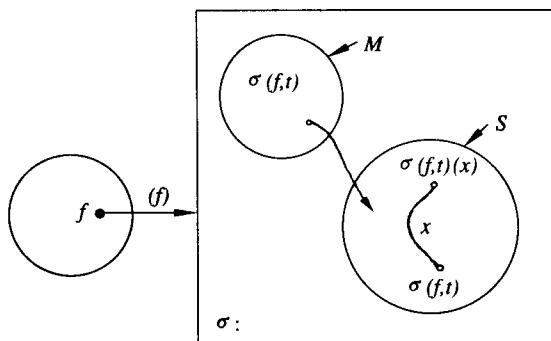


图 F. 8 一般系统模型

在形式上, 系统进化可用各种“轨道”函数予以描述。 Z 的时间轨道

$$e_{f,x}: T \rightarrow S$$

对于每个 $x \in S$ 及 $f \in F$, 定义为

$$e_{f,x}(t) = \sigma(f, t)(x), \text{ 一切 } t \in T; \quad (\text{F. 73})$$

Z 的输入轨道

$$i_{x,t}: F \rightarrow S$$

对于每个 $t \in T$ 及 $x \in S$, 定义为

$$i_{x,t}(f) = \sigma(f, t)(x), \text{ 一切 } f \in F; \quad (\text{F. 74})$$

而 Z 的输出轨道

$$O_{x,f} = \zeta \circ e_{f,x}, \text{ 每个 } x \in S, f \in F \quad (\text{F. 75})$$

其中, Q 为输出集, 输出函数为

$$O_{x,T}: T \rightarrow Q$$

怀莫尔还从形式上说明了耦合、子系统与组元以及系统分类等概念。

怀莫尔体系属于离散自动机理论和用微分方程规定的连续系统理论。他的系统定义本质上基于状态转移结构。他的理论既可应用于包含连续变量在内的混合系统, 也可应用于由有限集规定的各种图灵 (Alan Mathison Turing, 1912—1954) 计算机。

F.3.3 克里尔体系

克里尔认为梅萨洛维克和怀莫尔的体系具有演绎性质, 而他的理论具有归纳性质。他不是从公理出发定义系统, 而是在定义系统之前, 根据人们对各门学科 (自然科学、社会科学、工程学、数学和艺术等) 中各种系统和系统类型的直观, 先辨认与所包含各变量 (如行为、状态、转移、要素、耦合、分解层次等) 的特殊性质无关的各种系统特性; 然后对已搜集的各种系统特性进行分类和形式化。由此, 在满足一定自然需要的限定特性 (原始特性) 范围内, 得到关于系统的五个基本定义。

(1) 系统 S 是在一定分解层次上考察的诸量的给定的集。从数学上说, 系统 S 是三元组 (X, t, L) , 其中 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是外量的集, t 是时间, $L^n = \{X_1, X_2, \dots, X_n, T\}$ 是分解层次。

(2) 系统 S 是所考虑的诸量在时间上的变量集。从数学上说,

系统 S 是一元组 (M) , 其中 M 是 n 元组 $\{(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)) \mid t \in T, x_i(t) \in X_i, \text{对于一切 } i = 1, 2, \dots, n\}$ 的集。

(3) 系统 S 是外量的瞬时值和/或过去值和/或未来值之间在时间上不变的给定关系。这一关系可能容许(但并非必须)概率解释。从数学上说, 系统 S 是一元组 $[R(P_1, P_2, \dots, P_m)]$, 其中 R 是在 $X_{j=1}^m P_j$ 上规定的关系, 而 $P_j = X_j$, 当对于一些 β 有 $j \leftrightarrow (j, \beta)$; 或者 S 是二元组, $[R(p_1, p_2, \dots, p_m), P(R)]$, 其中 R 同上, $P(R)$ 是在 R 上规定的概率测度, 令 $P(r)$ 是出现 r 的概率, 这里 $r \in R$ 。

(4) 系统 S 是诸元素及其恒常行为的给定集合, 也是诸元素之间、元素与环境之间耦合的集。从数学上说, 系统 S 是二元组 (B, C) , 其中 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_r\}$ 是论域中诸元素的一切恒常行为的集, $C = \{c_{ij} \mid c_{ij} = A_i \cap A_j, i \neq j\}$ 是诸元素对 (a_i, a_j) 耦合的集, $A = \{a_0, a_1, \dots, a_r\}$ 既包含环境的元素 (a_0) 又包含论域中的元素 $a_1, a_2, \dots, a_r$ 。

(5) 系统 S 是状态的集与状态间转移的集。对于所出现的状态转移可容许(但并非必需)概率解释。从数学上说, 系统 S 是二元组 $[S, R(S, S)]$, 其中 S 是状态集, R 是在 $S \times S$ 上规定的关系; 或者 S 是三元组 $[S, R(S, S), P(R)]$, 其中 S 与 R 同上, $P(R)$ 是在 R 上规定的概率测度, 若 $(S_i, S_j) \in R$, 则 $P(S_j \mid S_i)$ 是从状态 S_i 到状态 S_j 的转移之条件概率。

每个基本定义可添加其他特性而得以补充, 也可以结合几个基本定义而得到新的系统定义。由此可得到一个系统定义系列。其中的每个定义与系统类型问题中的特殊类有关。原始特性是预先要给出的, 而二级特性则必须去发现。一切二级特性的集代表关于所论问题的等价类。类似地, 那些采用相同的系统定义并需要被确定的各种二级特性的一切系统类型问题也产生一个等价类。这样, 用这些系统定义把系统类型问题加以分类, 从而建立起一般系统方法论的广泛基础。

克里尔所考虑的原始特性关于时间是恒常的。奥恰德(Robert A. Orchard)则认为在许多问题(如进化系统研究)中系统的时间序列也是一种系统,并称之为第六个基本定义。这表明系统基本特性的时间变化也被看作是系统的基本特性,而时间不变性是时间变化的一个特例。这样,用第六个基本定义可研究各种进化过程,如自组织、自复制等。奥恰德的工作代表着一般系统理论的一个重要发展趋势。

F.3.4 托姆突变理论

突变理论(Catastrophe theory)是由法国数学家托姆(René Thom, 1923—2002)创立的,他于1972年发表的《结构稳定性与形态发生学》是突变理论的奠基性著作。那以后齐曼为突变理论的发展作出了卓越贡献。突变理论的源流可追溯到惠特尼(Hassler Whitney, 1907—1989)关于光滑映射的奇点理论、庞加莱(Henri Poincaré, 1854—1912)与安德罗诺夫(Aleksandr Aleksandrovich Andronov, 1901—1952)关于动力系统的分叉理论。突变理论所研究的是系统对外界条件的平滑变化所做出的突变反应,尤其是突变点的分类与突变点附近的系统性态的特征。

我们在本书5.2已经看到,当系统控制变量连续变化到一定量值时,系统状态会出现不连续的突变即分叉。托姆等人发现,当系统的控制变量即余维数 ≤ 4 时,发生七种类型的突变,如表F.1所示,当系统的余维数 ≤ 5 时,则发生11种类型的突变。这里所谓余维数,是指为表示一个几何对象所需的方程数目,一般等于这个对象的维数与它所在空间的维数之差。下面,看余维数不大于4时可能出现的几种不同突变类型。

1) 折叠型

考虑一个系统,其势函数是

$$V(x) = x^3 + ux \quad (\text{F.76})$$

则其相空间是二维的。平衡曲面 M 是曲线

$$3x^2 + u = 0 \quad (\text{F. 77})$$

奇点集 S 是平衡曲面 M 的子集, 还满足方程

$$6x = 0 \quad (\text{F. 78})$$

因此是一个点 $(0, 0)$ 。分叉点集 B 是奇点集 S 在控制空间 C 即直线 $x = 0$ 上的投影, 因此是一个点 $u = 0$ 。

由图 F. 9 可知, 分叉点集把控制空间分成两个区域, 即正负 u 轴。

表 F. 1 七种初等突变

突变类型	余维数	势函数	突变芽
折叠型	1	$a_1 x + x^3$	x^3
尖顶型	2	$a_1 x + a_2 x^2 \pm x^4$	$\pm x^4$
燕尾型	3	$a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + x^5$	x^5
蝴蝶型	4	$a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \pm x^6$	$\pm x^6$
椭圆脐型	3	$a_1 x + a_2 y + a_3 y^2 + x^2 y - y^2$	$x^2 y - y^2$
双曲脐型	3	$a_1 x + a_2 y + a_3 y^2 + x^2 y + y^2$	$x^2 y + y^2$
抛物脐型	4	$a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + x^2 y + y^4$	$x^2 y + y^4$

如果 $u > 0$, 则方程 (F. 77) 无实数解, 从而 V 没有临界点; 如果 $u < 0$, 则 V 有两个临界点, 一个极小点和一个极大点, 从而有两个平衡点, 其中一个稳定, 另一个不稳定; 当 $u = 0$ 时, 两个平衡点合并为一个拐点。

2) 尖顶型

这是在本书 5.2 已介绍过的类型。这时, 系统的势函数为

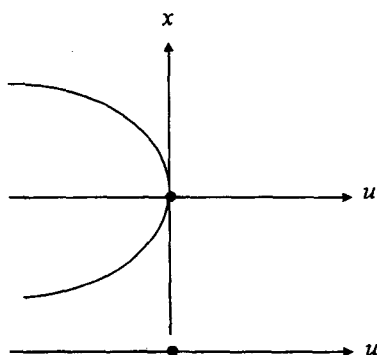


图 F. 9 折叠型突变的平衡曲面和分叉点集

$$V(x) = x^4 + ux^2 + vx \quad (\text{F. 79})$$

其相空间是三维的。平衡曲面 M 是

$$4x^3 + 2ux + v = 0 \quad (\text{F. 80})$$

奇点集 S 是 M 的一个子集, 还满足方程

$$12x^2 + 2u = 0 \quad (\text{F. 81})$$

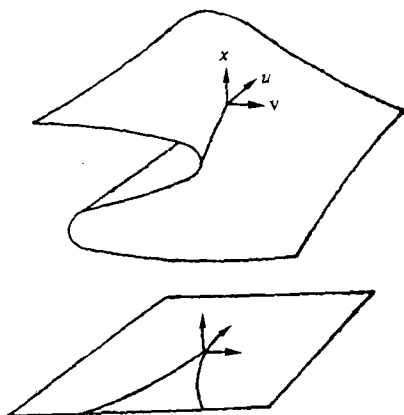


图 F. 10 尖顶型突变的平衡曲面和分叉点集

与之对应的分叉点集 B 的方程为

$$8u^3 + 27v^2 = 0 \quad (\text{F. 82})$$

由图 F. 10 可知(并参考图 5—10), 在尖顶型范围内, 势有两个极小点, 它们被一个极大点隔开, 而尖顶型之外则只有一个极小点。当 $u > 0$ 时, v 的变化只引起 x 的光滑变化; 当 $u < 0$ 时, 随着 v 的变化达到一定程度, x 的变化出现不连续性。

3) 燕尾型

设一个系统的势函数为

$$V(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx \quad (\text{F. 83})$$

其相空间是四维的。平衡曲面 M 是超曲面

$$5x^4 + 3ux^2 + 2vx + w = 0 \quad (\text{F. 84})$$

奇点集 S 是 M 的一个子集, 还满足方程

$$20x^3 + 6ux + 2v = 0 \quad (\text{F. 85})$$

从式(F. 84)和(F. 85)可消去 x 而得到分叉点集 B 的方程, 它是三维控制空间 C 中的一个曲面。不过, 我们所关心的是系统的定性性态, 所以可只用 B 的图形进行讨论。

图 F. 11 和图 F. 12 分别表示燕尾型的分叉点集及其截线。通过

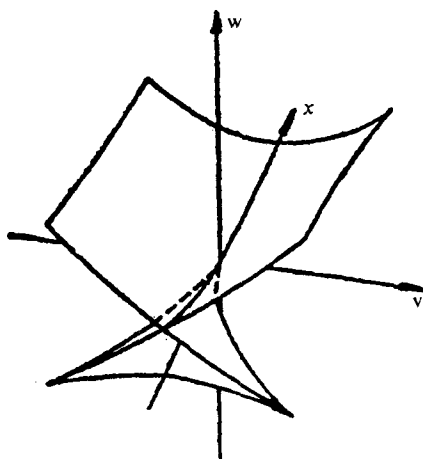


图 F.11 燕尾型的分叉点集

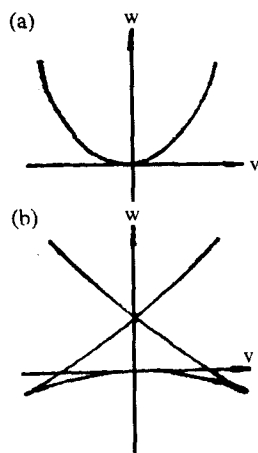


图 F.12 燕尾型分叉点集的截线

(a) $u > 0$; (b) $u < 0$

分析可知,为了在 B 上找到划分 C 所得各区域中势的形式,只需考虑 $v=0$ 和 $u < 0$ 的点。那么,从方程(F.84)可知

$$x^2 = \frac{1}{10} [-3u \pm \sqrt{9u^2 - 20w}] \quad (\text{F.86})$$

当 $w > 9u^2/20$, 方程(F.84)无实根, V 无临界点; 当 $0 < w < 9u^2/20$ 时, V 有四个临界点, 即两个极大点和两个极小点; 当 $w < 0$ 时, V 有两个临界点, 即一个极大点和一个极小点。这样, 在图 F.11 中, 曲面上方不可能有稳定平衡点, 曲面下方有一个稳定平衡点, 另两个稳定平衡点在燕尾内。

4) 椭圆脐型

设一个系统的势函数为

$$V(x, y) = (1/3)x^3 - xy^2 + w(x^2 + y^2) - ux + vy \quad (\text{F.87})$$

其相空间是五维的。平衡曲面 M 是三维超曲面

$$x^2 - y^2 + 2wx - u = 0 \quad (\text{F.88a})$$

$$-2xy + 2wy + v = 0 \quad (\text{F. 88b})$$

奇点集 S 是 M 的一个子集, 还满足

$$\begin{vmatrix} 2x + 2w & -2y \\ -2y & -2x + 2w \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{F. 89})$$

即

$$\Delta = 4(w^2 - x^2 - y^2) = 0 \quad (\text{F. 90})$$

亦可从分叉点集的图形上考察该系统。图 F. 13 表示 $w = \text{常数}$ 时分叉点集 B_w 的略图。图中尖顶迹线是抛物线, 因此全部分叉点集的图形为图 F. 14。经过分析可知, 当 $w > 0$ 时, 与尖顶锥体对应的临界点为三个鞍点和一个极大点; 当 $w < 0$ 时, 与尖顶锥体对应的临界点为三个鞍点和一个极小点。

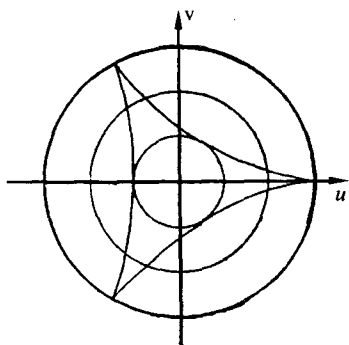


图 F. 13 椭圆脐型分叉点集的截线

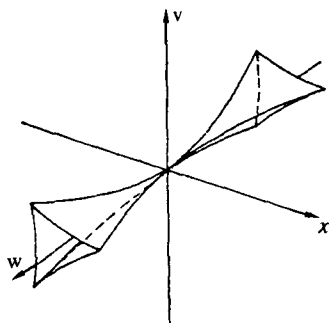


图 F. 14 椭圆脐型的分叉点集

除上述的突变类型外, 人们还研究了蝴蝶型、印第安人茅舍型、双曲脐型、抛物脐型、符号脐型、第二椭圆脐型和第二双曲脐型。

突变理论现在广泛应用于硬科学与软科学, 尤其在生物学、社会学、心理学等领域显示了自己的价值。在系统学中, 它对于研究复杂系统进化也是一个不可缺少的工具, 而它本身也常被视为一种系统理论。

F.3.5 曼德勃罗的分形几何学

分形几何学的创始人是曼德勃罗。他于 1967 年在美国《科学》杂志上发表“英国的海岸线有多长?”一文。1973 年在法兰西学院讲课时提出分形几何学的基本构想。此后,《分形几何学》(1977 年)、《自然界的分形几何学》(1982 年)等书相继出版。到了 20 世纪 80 年代,在全世界掀起了分形研究热潮。分形几何学方面的创造性工作使他荣获 1985 年巴纳德奖以及其他许多荣誉。

分形(fractal)一词,是曼德勃罗于 1975 年首创的,其词源为拉丁语形容词 fractus,表示“极不规则”、“极为破碎”的含义。分形一词目前还没有严格定义,但是在目前广泛使用的意义上,所谓分形是指一类没有特征长度的几何对象,这些几何对象可以是物体的形状和结构,也可以是系统功能或信息的模式,还可以是系统的时间模式或思维模式。

经典几何学的研究对象都是规则而光滑的几何形状。初等平面几何主要研究直线与圆,平面解析几何主要研究直线(一次曲线)和二次曲线,微分几何研究光滑的曲线和曲面,而代数几何研究复空间中的代数曲线。但是,在现实生活中,我们经常看到的却是极不规则、极不光滑的几何形状,如起伏不平的山脉,弯弯曲曲的海岸线,变幻莫测的浮云,美丽多姿的雪花,等等。在这些几何形状面前,传统几何学不能令人满意。这些极不规则、极不光滑的几何对象被曼德勃罗统称为分形。

分形的特征可从下面几个方面考察。

1) 无标度性

对象世界的所有形状和几何图形可分为两种。其一是有特征长度(或称标度)的几何对象。例如,正方形、矩形、圆、椭圆、球等图形都有其特征长度,各种人造物如自行车、香烟、桌子等也有其特征长

度。对于有特征长度的物体,我们可用有限个具有特征长度的图形(如长方体、圆柱或球等)来逼近其形状。

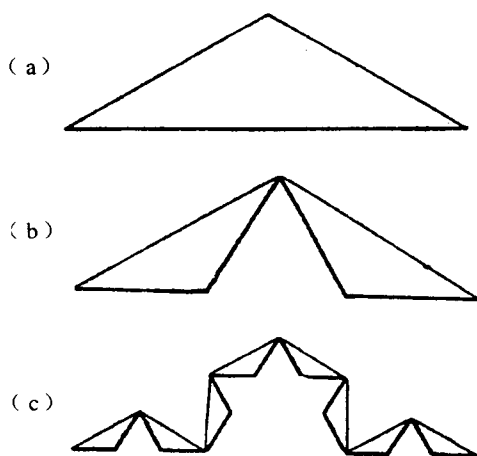


图 F.15 用线段和三角形逼近科赫曲线

其二是没有特征长度的几何对象。例如,考虑用线段和三角形来逼近形状复杂的科赫曲线,见图 5—2。最粗的近似为图 F.15(a),实则它一点儿都不像科赫曲线。但是图 F.15(c)有点像科赫曲线。如果反复进行这一逼近操作,最终可用无穷多个无限小的线段和三角形来得到科赫曲线。从中可知,要用有限个具有特征长度的线

段和三角形来表示科赫曲线,任何时候都产生不可忽视的大差异,为消除这些差异,就必须采用无穷多个不同大小的线段和三角形(包括无穷小的线段和三角形)。

一般来说,分形是不能用有限个具有特征长度的图形来充分逼近的;也就是说,只有用无穷多个具有不同特征长度的图形才能充分逼近分形。这就表明,分形没有特征长度,或者说,分形具有无穷多个特征长度。

2) 极不光滑

经典几何学所研究的是处处连续,至少分段分块光滑的曲线和曲面。例如,球的表面处处都是光滑的;长方体虽有棱角,但它的六个面都是光滑的。地球的真正表面是凹凸不平的,但是这些差值与地球的特征长度如半径相比可以忽略不计,从而可将地球看作是一

个光滑的球或椭圆。

但是,分形没有特征长度,即使处处连续,也处处不光滑。不管怎样放大,分形的形状与原来的一样复杂。因此,分形曲线和分形曲面处处不能引出切线,是处处不可微的。这也就决定了在分形研究中不能不大量使用计算机来进行数值分析和模拟。

3) 自相似性

所谓自相似性,是指如果将一个图形的一部分放大到原图形的大小,其形状与原图形相同。例如,如果把图 5—2 所示科赫曲线区间 $[0, 1/3]$ 中的图形放大三倍,那么放大后的图形与原来的科赫曲线形状完全相同。把区间 $[2/3, 1]$, $[1/3, 1/2]$, $[1/2, 2/3]$ 的图形放大三倍,也会得到原来的科赫曲线。如果把区间 $[0, 1/9]$ 的图形放大九倍,亦可得到与原来相同的图形。对更小的部分进行放大,只要取适当放大倍数,总能得到与原来相同的图形。

一般地说,分形具有无穷嵌套的自相似结构。在分形中,任何一个相对独立的部分,在一定程度上都是整体的缩影。这些部分被称为分形元,或生成元。分形元与分形有相似性,分形可视为分形元的无穷次运动的产物。

4) 分形维数

由于分形具有无标度性,无法以特征长度来刻画分形的特征。分形维数是目前用来刻画分形的最重要的定量参数。分形几何学的发展有赖于对维数的研究。在这过程中人们提出了许多与欧几里德维数不同的维数。

(1) 欧几里德维数 d

在欧几里德空间中,为确定几何对象中任意一点的位置所需的独立坐标数,就是该几何对象的欧几里德维数。这样,点是零维,直线是一维,平面是二维,立体是三维,时空连续体是四维。即是说,直线上的任意点可用一个实数表示,平面上的任意点可用二个实数表

示,立体上的任意点可用三个实数表示; n 维空间中的一点一般可用 n 个实数表示。

欧几里德维数有两个特点,其一是它只能取自然数,其二是它与自由度相等。但是,在一些几何图形的研究中,这两点都遇到了挑战。

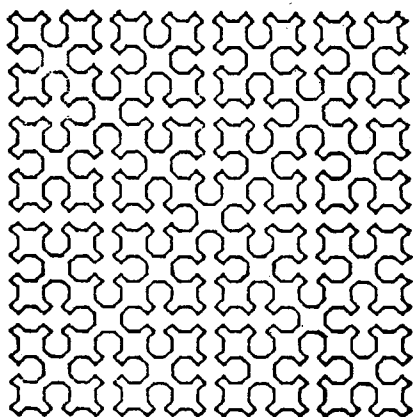


图 F.16 皮亚诺曲线

首先,看皮亚诺曲线。这是皮亚诺 (Giuseppe Peano, 1858—1932) 于 1890 年设计的一种曲线,可定义为图 F.16 所示折线的极限。图中可知,皮亚诺曲线可以完全覆盖一个平面。这是一个典型的分形图形。在此图中,可用一个实数表示二维正方形上的任何一点。这个图形可推广到 n 维空间,即是说用一个实数可表示 n 维空间上的任何一点。因此,

从自由度看, n 维空间可被视为一维空间。这促使人们重新考虑维数的意义。

其次,豪斯道夫于 1919 年引入不限于整数的维数,人们开始认识到几何对象的维数可以是非整数。

这样,欧几里德维数被证明为不是唯一的维数,也不是对于任何几何对象都适用的普适维数。

(2) 分形维数 D_F

目前,分形维数还没有严格的定义,有时把多种非欧几里德维数统称为分形维数。它既可以是整数也可以是非整数。通常,豪斯道夫维数和容量维数被看作是分形维数。但是,为了使分形维数具

有普适性,能适用于自相似性不成立的场合,人们正在进行各种尝试。

其方案之一是用观测尺度和被观测个数的关系定义分形维数。设观测尺度为 r ,被观测个数为 $N(r)$,是幂函数,则分形维数可定义为

$$D_F = - \frac{\log N(r)}{\log r} \quad (\text{F. 91})$$

为把式(F. 91)推广到 $N(r)$ 为非幂型的情况,将 r 和 $N(r)$ 标绘在双对数图上,那么式(F. 91)中的 D_F 就表示其斜率。只要 $N(r)$ 是光滑的函数,将观测尺度为 r 时的分形维数定义为此图在点 $(r, N(r))$ 上的斜率,即

$$D_F(r) = - \frac{d \log N(r)}{d \log r} \quad (\text{F. 92})$$

式(F. 92)所定义的(广义)分形维数不仅适用于具有自相似性的分形,而且还可适用于不具有自相似性的情况。

(3) 相似维数 D_s

如果某一图形是由把此图形缩小成 $1/\alpha$ 的 N 个相似形所组成。因 $N = \alpha^D$,相似维数可定义为

$$D_s = \frac{\log N}{\log \alpha} \quad (\text{F. 93})$$

例如,在图 F. 17 中

线 段: $D_s = \log 2 / \log 2 = 1$

正方形: $D_s = \log 4 / \log 2 = 2$

立方体: $D_s = \log 8 / \log 2 = 3$

用式(F. 93)可计算分形的相似维数。例如,

皮亚诺曲线: $D_s = \log 4 / \log 2 = 2$

科赫曲线: $D_s = \log 4 / \log 3 = 1.2618 \dots$

科赫岛海岸线: $D_s = \log 8 / \log 4 = 1.5$, 见图 F. 18。

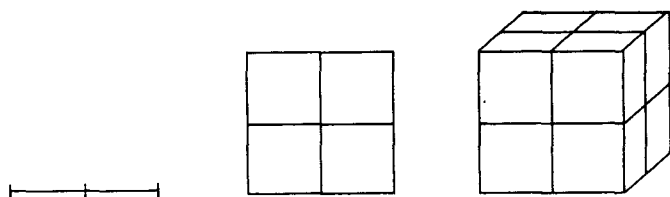


图 F.17 把线段、正方形、立方体的
单位长度增加一倍

值得注意的是,相似维数仅适用于具有严格相似性的有规分形,不宜用于随机分形等。

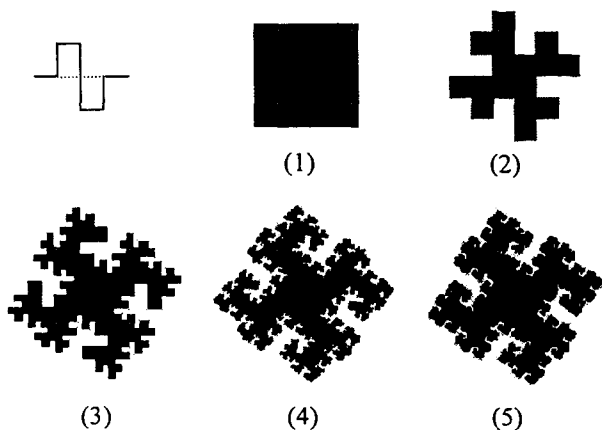


图 F.18 科赫岛海岸线

(4) 豪斯道夫维数 D_H

设 $D > 0$, 用直径小于 $\epsilon > 0$ 的可数个数的球覆盖集合 E . 设各球的直径为 $d_1, d_2, \dots, d_k$, 则豪斯道夫测度可定义为

$$M_D(E) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \inf_{d_i > 0} \sum_k d_k^D \quad (\text{F.94})$$

当 $M_D(E)$ 从 0 趋于无穷大时, 称 D 为集合 E 的豪斯道夫维数, 记为 D_H 。

例如,在图 F. 19 中,当用圆球逼近科赫曲线时,如果在覆盖方法上完全没有重复,就可知道:

$d_1 + d_2 + \cdots + d_k$ 为一维测度;

$d_1^2 + d_2^2 + \cdots + d_k^2$ 比例于二维测度;

.....

$d_1^D + d_2^D + \cdots + d_k^D$ 比例于 D 维测度。

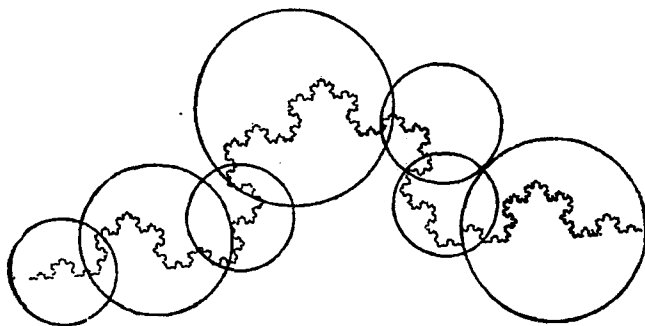


图 F. 19 用圆包覆科赫曲线

当 $\epsilon \rightarrow 0$ 时,可使逼近程度不断提高,这也就意味着可求出所给图形固有的测度。就科赫曲线而言,其豪斯道夫测度,当 $D=1$ 时为无穷大;当 $D=2$ 时为 0。更细致的数学分析表明,当 $D < \log_3 4$ 时,其测度为无穷大;当 $D > \log_3 4$ 时,其测度为 0;当 $D = \log_3 4$ 时,其测度取定值。实际上,科赫曲线的豪斯道夫维数为

$$D_H = \log_3 4 = \log 4 / \log 3 = 1.2618 \cdots$$

与其相似维数相同。

(5) 容量维数 D_C

设集合 E 是 d 维欧几里德空间 R^d 中的有界集合。当用直径为 ϵ 的 d 维球覆盖住该集合时,设 $N(\epsilon)$ 为球的最少数目,则集合 E 的容量维数可定义为

$$D_C = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} \quad (\text{F. 95})$$

例如看康托尔三分集,见图 7-38。取 $[0,1]$ 线段三等分后舍去中段,对剩下的两段再分别施行相同的操作。以此无穷,最后剩下的点集就是康托尔三分集。可计算其容量维数为

$$D_C = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log 2^n}{\log 3^n} = 0.6309\cdots$$

容量维数与豪斯道夫维数很相似。在豪斯道夫维数中所使用的球可以大小不等,但是在容量维数中所使用的是同样大小的球。因此,豪斯道夫维数可以看作是用最有效的覆盖定义的维数。

(6) 信息维数 D_I

当把点集分割成边长为 r 的相格时,设该点集中的各点进入第 i 号相格的概率为 $p_i(r)$,则该点集的信息维数可定义为

$$D_I = \frac{I_0 - I(r)}{\log r} \quad (\text{F. 96})$$

其中,

$$I(r) = - \sum_i p_i(r) \log p_i(r) \quad (\text{F. 97})$$

(7) q 阶信息维数 D_q

如果在信息维数中 $r \rightarrow 0$,那么对于任意正数 $q (\neq 1)$,可定义 q 阶信息维数 D_q 为

$$D_q = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{I_q(r)}{\log(1/r)} \quad (\text{F. 98})$$

其中,阶数 q 的信息量 $I_q(r)$ 为

$$I_q(r) = \frac{1}{1-q} \log \sum_i p_i^q \quad (\text{F. 99})$$

(8) 李亚普诺夫维数

这是用李亚普诺夫指数(详见本书 7.6)定义的维数。设在某个时刻 t ,吸引子上的两个点在方向为 α 时相隔距离为 $L_\alpha(t)$ 。经过时间 τ

后,这两点间的距离为 $L_a(t+\tau)$ 。这时,李亚普诺夫指数可定义为

$$\lambda_a = \frac{1}{\tau} \left\langle \log \frac{L_a(t+\tau)}{L_a(r)} \right\rangle \quad (\text{F. 100})$$

当 $\lambda_a > 0$ 时,这两点沿方向 α 按指数函数相分离;当 $\lambda_a < 0$ 时,它们就按指数函数相接近。 λ_a 的数值正好与空间的自由度数相等。将各个李亚普诺夫指数记为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_d$, 那么可定义李亚普诺夫维数为

$$D_L = j - \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_j}{\lambda_j} \quad (\text{F. 101})$$

其中, j 在 $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_j$ 为负值的下标中是最小的,即

$$j = \min \left\{ n \mid \sum_{i=1}^n \lambda_i < 0 \right\} \quad (\text{F. 102})$$

例如,在埃农吸引子中, $\lambda_1 = 0.42, \lambda_2 = -1.58$, 因此,

$$D_L = 2 - (0.42 - 1.58) / (-1.58) \approx 1.26$$

再如,在洛伦兹吸引子中, $\lambda_1 = 1.37, \lambda_2 = 0.00, \lambda_3 = -22.4$, 因此,

$$D_L = 3 - (1.37 + 0.00 - 22.4) / (-22.4) \approx 2.06$$

除了上述的各种维数之外,还有谱维数、广延维数等,在此不一一介绍。下面看上述各种维数之间的关系。除了谱维数和广延维数之外,上述各种能取非整数的维数都大于 d_T , 而小于 d :

$$d_T \leq D_F, D_S, D_H, D_C, D_I, D_q, D_L \leq d, \quad (\text{F. 103})$$

其中 d_T 为拓扑维数,只取整数值。对于填满欧几里德空间的集合,有 $d_T = d$, 因此所有这些维数都取同一数值。另外,

$$D_C \geq D_H \geq D_I \geq D_Q \quad (q > 1) \quad (\text{F. 104})$$

及

$$D_S \geq D_H \quad (\text{F. 105})$$

从上不难知道,分形是某种无穷过程的结果。因此,分形不仅能反映大量现存系统的结构特征,更重要的是系统的分形结构必然与

系统进化连在一起。这样,分形理论为描述大量系统进化过程提供了一种有效工具。

F.4 以控制论和/或信息论为背景的系统理论

我们首先应该承认这一标题是不确切的,因为控制论或信息论也是一种系统理论,并且有的学者所说的系统理论实际上就是控制论。这里,我们只是简单地介绍一些从事控制论和/或信息论及其相关领域研究的学者所谈论的“系统理论”究竟是指的什么。

F.4.1 控制论和控制理论

在中文中,Cybernetics 被译为“控制论”,Control theory 被译为“控制理论”,两者只有一字之差。但是,在学术界的习惯中两者的使用范围是很不相同的。

显然,控制论和控制理论有着类似的起源,都与对人造机器的自动控制有关。但是两者的区别也是明显的。控制理论不管它是古典的还是现代的,都以对机器的控制为主要研究对象和目的,但是控制论则以探讨机器和生物中起作用的一般控制原理为自己的目标。从这个意义上说,控制论乃是一般控制理论。就目前的实际情况而言,控制理论主要研究对象还是机器的自动控制问题,而控制论所探讨的问题却宽广得多。我们知道,控制论已有了自己的大家族,其中包括工程控制论、生物控制论、社会控制论、经济控制论、教育控制论等。因此,与控制理论相当的控制论领域只是工程控制论。当然,在古典控制理论和现代控制理论基础上发展起来的大系统理论把复杂的经济系统和社会系统也作为自己的研究对象,这只不过是表明了控制理论家们已不愿意将自己的研究局限于传统领域。从中,我们也能看出控制论和控制理论的区别和相结合的趋势。

从以上的讨论中还能看到,控制论作为一种系统理论所探讨的是系统的控制机制,因而不包括系统理论或系统学中的其他方面。不过,在不同学科相互交错和一体化的趋势越来越受重视的现实中,这种区别只有相对的含义。

F.4.2 屈弗缪勒的系统理论

在1977年,西德慕尼黑工业大学通信技术教研室主任马尔可(Hans Marko, 1925—)发表了一部著作《系统理论方法》。他所说的“系统理论”不是 Systemlehre,而是 Systemtheorie,而这一系统理论被认为是屈弗缪勒于1949年创立的。

马尔可在该书中指出:系统理论已成为在自然科学和工程技术中描述复杂因果关系的最重要方法。它的出发点是借助频谱变换,即用傅立叶变换或拉普拉斯变换来描述因果关系的。这一系统理论的主要应用领域一向是通信技术领域。但它并不只局限于通信技术,还应用于那些与采用通信技术方法有关的学科,如测量技术、调整技术或广义控制论。

F.4.3 法乌热与德培罗的系统理论

法国人法乌热(Pierre Faurre)和德培罗(Michel Depeyrot)著有《自动机基础》一书,后译成英文出版,书名取为《系统理论基础》(1977年)。

阿勒格里(M. Allegre)在书的法文版序言中指出:理论系统(理)论是分析系统和实现系统性能最优化的数学工具。

法乌热与德培罗在序言中指出:对我们来说,系统理论的范围现在比15年前广泛得多。当时该学科只局限于继电器与控制理论。

作者们使用的主要概念是动态系统概念。据此,他们试图统一地描述古典控制理论、现代控制理论以及从简单逻辑网络到计算机

的数字系统。他们把系统理论分为两个主要分支:连续系统理论(包括确定性控制、估计与统计滤波、最优随机控制、确定性系统或随机系统辨识、自动测试或诊断、适应性控制、实时模拟或数字信息处理等)和数字系统理论。

该书的内容包括 PID(比例积分微分)控制、过程控制、线性动态系统的内部描述和外部描述以及系统的实现、稳定性、最优控制、信号处理、辨识、组合逻辑、时序逻辑和有限自动机等。

F.4.4 卡尔曼的系统理论

卡尔曼(Radolph Emil Kalman, 1930—)是现代控制理论的创始人之一。卡尔曼用状态空间表示法研究线性系统的工作和所谓卡尔曼滤波器,是人们所熟悉的。

1981年8月,卡尔曼曾应邀来华讲学,讲座的题目为“系统理论”。他认为,系统理论是包括数学、应用数学、计算机、工程学、统计学和经济学在内的广泛领域。他在讲座中实际上讲了三个内容:代数系统理论、系统辨识和卡尔曼滤波理论。

F.4.5 一些苏联学者提出的“系统学”

我们在本书第二章已谈到,在系统理论研究中,苏联人创造了一个新术语——“系统学”(Системология,可英译为 Systemology)。那以后,苏联出版了一些以“系统学”为书名的著作。其中较有名的是弗雷士曼的《系统学原理》(1982年)。该书主要论述复杂系统的基本性质和规律及其形式化,还论述系统生态学。该书在理论综合方面有些特色,但总的来说距离作为系统科学基础理论的系统学还是有相当大的距离,尤其是系统进化问题未受到应有的重视。

F.4.6 福雷斯特的系统动力学

福雷斯特(Jay Wright Forrester, 1918—)的系统动力学也可以算作一种系统理论。它是一门以控制论和信息论为背景的系统方法论学科。它主要用来为复杂动态系统建立动力学模型,以数字计算机进行计算与模拟(采用 DYNAMO 语言)。它能用来较方便地模拟非线性多重反馈复杂大系统,能在一定程度上实现人的判断力、经验和逻辑推理的结合,能较好地适用于制定不确定性大的长期宏观规划。

系统内部反馈回路可以用图形简单地表示,因此在建模时采用图形表示法。系统动力学主要有三种建模方法:一是因果关系图,表示系统内各种相互作用的因果链;二是流图,表示反馈系统动态性能的积累效应(如流位、流率等);三是混合图,即因果关系图和流图的结合。

系统动力学在相当广泛的领域得到应用,国际上已出现了据系统动力学建立的世界模型、国家模型、城市模型及工业企业模型等。但它在系统理论上的贡献并不显著。

F.4.7 其他

在控制论和/或信息论的背景下,系统理论家们还开发了其他一些系统理论,例如大系统理论、灰色系统理论、模糊系统理论等。

大系统理论是 20 世纪 70 年代发展起来的一个新领域,它研究各种大规模复杂系统的控制和信息过程的共同规律。在历史发展上,大系统理论被视为第三代控制理论,是综合自动化的理论基础。它所倡导的多级递阶控制方案,有机地结合集中控制方案与分散控制方案,取其长避其短,在社会经济管理系统及其他领域中得到广泛应用。

模糊系统理论是在扎德的模糊集理论上发展起来的。所谓

模糊系统理论,是推广通常的系统理论得到的,以模糊集的形式表示系统所含的模糊性并能处理这些模糊性的系统理论。例如,传统的数学规划,如把目标函数替换为模糊目标(模糊集),把约束条件替换为模糊约束(模糊集),就变成模糊数学规划问题。虽然不能否认模糊系统理论在一般系统研究中的作用,但是就目前研究情况而言,它的主要研究对象是与控制有关的系统模糊性问题,因此可以说是模糊控制理论。

灰色系统理论亦可称灰色控制理论,是邓聚龙从 20 世纪 80 年代初起倡导的。他在灰数、灰方程、灰矩阵等概念基础上,建立了有别于“白箱”理论和“黑箱”理论的“灰色”理论,并与合作者们一起,把这个理论应用到相当广泛的领域,取得了引人注目的成果。目前最重要的研究还是对灰色控制的研究。

以上,我们简单地介绍了以控制论和/或信息论为背景的各种系统理论。这些理论的共同特点在于它们所研究的主要是系统的控制与信息过程,并且它们都把对现实系统的控制当作自己的基本任务。这些理论的研究成果虽然对一般系统研究或系统学不无贡献,但是它们基本上都属于系统科学中的方法论学科,而不是属于系统科学的基础理论领域。

F.5 以社会科学为背景的系统理论

在现代系统研究中一些社会科学家也为系统理论的发展做出了卓越贡献。他们或者从社会科学中抽象出系统理论,或者用系统理论研究社会系统,从而形成了社会科学领域的各种系统理论。

F.5.1 作为管理技术的系统理论

复杂系统特别是复杂经济系统的组织管理是人们在社会生活中

遇到的一个基本问题。在为解决这些管理问题的长期努力中逐渐形成了一些作为管理技术的系统理论。例如：

(1) 运筹学

20 世纪 40 年代开始形成,几十年来在理论和应用方面都有了较大的发展。它为在经济活动和军事活动中较合理地使用人力、物力、财力提供了一系列数学管理技术。在系统工程领域,通常把运筹学当作最重要的基础理论之一。运筹学的主要分支有线性规划、非线性规划、对策论、排队论、搜索论、库存论、决策论等。

(2) 投入产出分析法

亦称投入产出经济学,是美国经济学家里昂惕夫首先提出的。他把一个地区、一个国家、甚至整个世界的经济当作一个系统,分析其输入和输出,来探索和解释系统的结构和运行,从而为经济系统的计划和管理提供科学依据。

“投入产出法,简单地说,是根据国民经济各部门之间产品交易的数量编制一个棋盘式投入产出表。表中各横行反映某一部门的产品在其他部门中的分配,各纵列反映某一部门在生产消费过程中从其他部门得到的产品投入。根据投入产出表计算投入系数(也称为技术系数),即各个部门每单位产出所需由其他部门投入的产品数量,并编制投入系数表。这些系数可以用来建立一个线性方程组,通过矩阵代数的求逆原理计算最终需求的变动对各部门生产的影响,或进行其他方面的分析研究。”^①

(3) 经济控制论

朗格(Oscar Ryszard Lange, 1904—1965)认为经济控制论是控制论在经济学中的应用。他曾经用控制论原理表述马克思再生产公式、凯恩斯(John Maynard Keynes, 1883—1946)乘数、里昂惕夫矩

^① 里昂惕夫 W. 投入产出经济学. 北京:商务印书馆,1980. ii—iii

阵,并指出这三者在数学形式上的类似性,以此说明了控制论在经济学理论研究中的有效性。但是就经济控制论的当前水平来看,无论在社会主义国家还是在资本主义国家,它把提高经济管理科学水平放在首位。

F.5.2 经济学基础理论研究中的一个新思潮

在整个社会科学中,经济学是一门最成熟的学科。但是,传统经济学由于把自己的视野局限于生产、流通、分配与消费中的商品价值或价格问题,实际上已成为一种商业理论。理论经济学家们研究价值的转移、生成与分配,而应用经济学家们研究什么是赚钱之道。结果,一方面经济学为经济的高速增长和人类舒适生活空间的创建做出了贡献,另一方面经济学不得不为经济赖以继续增长的一切条件正在被破坏,人类的生存从根基上遭受威胁的严重局面承担不可推卸的责任。经济学的这一“罪过”可能有多方面的原因,但其中十分引人注目的一个原因是:经济学在为了自身的发展而广泛借助自然科学和数学成就时,竟然忽略了“整个科学的第一法则”即熵原理。

经济学的变革正是从试图克服这一局限性的尝试中开始的。如在本书 6.3.3 中所述,经济系统的研究不应与对其自然环境的研究隔裂开来,甚至应当把经济系统和周围自然环境当作一个广义经济系统来研究。经济学不仅要研究价值流,而且要研究物流、能流和熵流。

对于经济学来讲,“用熵原理来研究经济过程”显然是一个新的思路。最早提出这一新思路的不是经济学家,而是著名化学家、诺贝尔奖获得者索迪。早在 20 世纪 20、30 年代,他提出经济学应当重视财富的物理侧面,试图把经济学的出发点放在热力学第一定律和第二定律基础上。可惜过了数十年后他的观点才被人们所重视。但是,这一新思路看来并不是某个人的偶然发现,它有着历史的必然

性。经济学家保尔丁于 60 年代初又提出了用熵原理研究经济过程的重要性,而乔治斯库-罗根《熵原理与经济过程》(1972 年)一书的出版标志着一种新的经济学的诞生。

这样,经济学正在经历历史性的变革。如果说 150 多年前热力学第二定律的提出从理论上预示了牛顿力学世界观的破产,那么熵经济学、环境经济学和资源物理学等新理论的提出已经宣告了传统经济学体系必将发生重大变革。经济学正在期待着自己的爱因斯坦、普朗克和玻尔。但是,为了实现这一变革,光是熵原理还是不够的,应当把系统学的基本观点和基本原理广泛应用到经济现实中去。只有这样,才有可能把传统经济学改造成为非线性非平衡经济学,才有可能把狭义经济学改造成为把人类的经济活动和地球的自然过程结合在一起的广义经济学。

F.5.3 巴克莱的社会系统理论

在社会学领域,一些学者自发或自觉地达到了现代系统理论的境界。这里所要介绍的是巴克莱的工作。不过,我们先看在社会学领域非常著名的帕森斯的结构—功能主义。

帕森斯是社会学领域结构—功能主义学派的创始人和主要代表人物。他把一切行动系统的功能分为整合、模式维持、目标的达到以及适应,从而又把行动系统分为四个子系统即社会系统、文化系统、人格系统以及行为有机体。这些子系统的相互关联构成整个人类社会,而其中文化系统居于主导与支配地位。

他认为社会系统是由各要素协调一致的行动、相互关联的功能组成的一个统一整体,从而把研究重点放在对系统结构与功能的分析上,而均衡的思想是结构—功能主义理论的核心。他认为社会能通过自我调节维持其均衡。

帕森斯在他的后期著作中使用了控制论的一些概念,但他的基

本观点形成于 30 年代即各派系统理论产生之前,因此在很多方面他的用语有别于现代系统理论家的用语。

在社会学领域,巴克莱被视为一般系统理论运动的主要代表人物之一。1967 年他在《社会学与现代系统理论》一书中系统地阐述了他的社会系统理论。他认为,现代系统研究的原理和方法是研究社会文化系统的更适当的模型或理论框架的基础。他积极吸取贝塔朗非的一般系统理论、香农的信息论和维纳的控制论中的合理观点,从社会学角度阐述系统、边界、输入、输出、反馈等概念,并强调这些概念在社会学研究中的重要性。

巴克莱不仅对社会的力学模型(18 世纪及 19 世纪前半叶)、有机体模型(社会达尔文主义)和生物学模型(功能主义)作了批判,还对帕森斯的社会系统模型也作了批判。他认为帕森斯的模型实际上是力学(平衡)模型和有机体(内稳态)模型的混合物。他认为帕森斯的模型过分强调常态和稳定性,忽视社会系统中的变迁、冲突和竞争。这样,巴克莱倡导所谓过程模型(或称适应性系统模型)。

他主张,社会学的系统理论要从两个层次即微观社会学层次和宏观社会学层次上展开。在微观层次上,人格是一个潜在行动系统,而诸多个人的互动产生社会性。他把社会形式及其起源(形态形成)列为行动与互动的矩阵。

他认为,以往的社会学理论在解释大型制度方面也不能令人满意,因为那些理论关于制度的描述和所用的术语都是静态的,欠缺人际互动动力学观点。在宏观社会学层次上,系统理论模型同样有效。系统的各层次是互动的;一个由互动组元组成的系统同内部环境和外部环境进行着交易,致使外部环境中的知识以某种方式进入该系统。该系统逐步发展选择机制,据此对付环境的多样性。这样,社会文化系统被看作是由许多组元组成的复杂的适应性组织。它以科

学、技术、宗教等表示外部环境的多样性,以共同的理解、符号、规范和价值表示内部环境。新型制度(如社会形式和结构)的建立是一个选择过程,这一过程导致一些合法制度和非法制度,而最终的具体形式取决于各组元之间不断发生的互动和调节。

巴克莱试图用系统理论实现社会秩序构建机制和过程的概念化、系统化。他认为,社会学理论的新近贡献有结构与范畴方法、集体行为方法以及社会—心理方法,而系统理论家的任务是发展一种新的理论框架,来把这些方法都结合起来,至少是把其中的基本方法都结合在一起。

F.5.4 伽拉捷达吉的社会动力学

1982年伽拉捷达吉(Jamshid Gharajedaghi)在“社会动力学(二分法与辩证法)”一文中,从系统观点出发,用与/或关系、相变与组织模、整合与分化等概念阐述了社会动力学。伽拉捷达吉的观点可简述如下。

(1) 与/或关系

在社会系统研究中,对立趋势之间的关系至少有三种表达方式:其一是二分法,它表示一种“或”关系(不是包容的“或”,而是排他的“或”),即在冲突中必须决出胜负的胜/负之争;其二是连续统一体,它表示单维的冲突情景,其中对立趋势达到妥协;其三是对立趋势之间的辩证互动,它表示“与”关系,即对立趋势不仅共存并互动,而且形成互补关系。

在辩证关系中,对立趋势中的每个趋势被表示为一个维度,从而所得到的关于社会变化的多维图式。但是在二分关系中,对立趋势之间的关系是非此即彼的关系,从而所得到的关于社会变化的一维图式。例如,考虑稳定和变化这两种趋势。在二分法中,对一种趋势的关心之多与对另一趋势的关心之少耦合在一起,但在辩证法

中可出现四种结果,如图 F. 20 所示。图中,只有象限二与象限四的类型是二分法所能提供的。由此推理,两个对立趋势之间不仅会有胜/负关系,而且会有负/负关系、胜/胜关系。

变 化 \ 稳 定 性	小	大
大	(2) 变化大,稳定性小	(3) 变化大,稳定性大
小	(1) 变化小,稳定性小	(4) 变化小,稳定性大

图 F. 20 稳定性与变化

(2) 相变与组织模

在物理学上,当一个系统的状态取决于两个或多个变量时,一个变量的量变一旦超过临界点,就会导致该系统状态的相变。这是一种质变,意味着决定系统状态的各变量之间出现一套新的关系,如在气液相变中所看到的那样。

与相变类似,在社会系统中当某个趋势的变化达到一定程度时就会发生组织模的变化。结果,各种趋势的不同水平(小/大)按不同方式耦合,就会产生不同的组织模,如图 F. 21 所示。激进状态(不管它是反动的还是进步的)、保守状态、无政府状态和理想状态之间的区别是显而易见的。

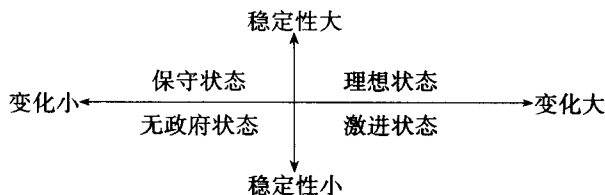


图 F. 21 社会系统状态类型

但是,物理系统与社会系统有重要的区别。物理系统是靠能量结合在一起,而社会系统是靠信息/知识结合在一起的。如同能级决定物理系统的组织模一样,知识水平规定社会系统的组织模。因此,知识在社会系统中的作用类似于能量在物理系统中的作用。但是,知识与能量不同,它不服从守恒定律,反而可以自创生。这一重要能力使得社会系统有可能在不出现突变(如尖顶)的情况下实现组织模的改变。

(3) 分化与整合

社会系统的发展既不同于物理模式的变化,也不同于生物进化。物理模式的变化是物质结构的复杂性不断增大的单维运动,生物进化是复杂性和有序性增大的二维运动,而社会系统的发展至少是三维运动,即在整合和分化不断增强的方向上出现的有目的的转变。

分化维强调内在的价值体系,表征复杂性增大、多样性增大、个人自主权(个人选择)增大、形态发生(新结构的创生)等趋势。整合维强调外在的价值体系,表征有序性增大、一致性和依附性增大、集体性(集体选择)增大、发展停滞(保持既有结构)等趋势。这些趋势相结合而构成一个整体,并决定所有社会功能的发展过程,即知识、权力、财富、价值和美的产生和传播。为简便起见省略目的维,就有图 F. 22。

在一个社会系统中,根据其文化特征、有组织群体的定向以及对整合或分化趋势的重视程度,可以观察到各种不同的组织模。这样,社会系统可以从混乱的简单状态发展到有组织的简单状态、混乱的复杂状态或有组织的复杂状态。

在一个给定的文化背景下,整合与分化过程有相应的上限与下限。在一个给定的文化边界内,与每个分化水平相对应,都有一个必需的整合水平。如果达不到这个整合水平,系统将陷入混乱。反之,

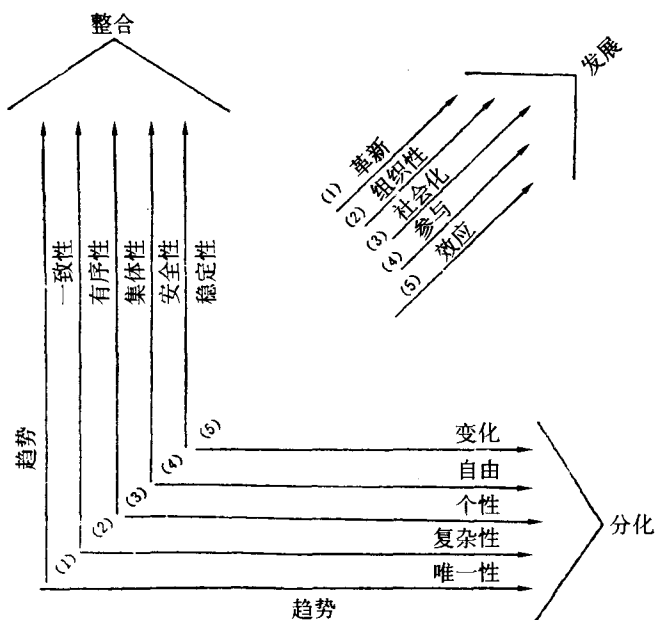


图 F. 22 社会系统的发展

为了防止压迫,较高水平的整合需要较高水平的分化。社会系统的周期振荡和崩溃主要是由于用二分法来处理辩证的现实。

(4) 辩证关系与二分关系的区别

一般来说,在有目的的行动者(个人或群体)之间,根据他们的目的和/或手段是否调谐,存在着四种关系:合作,是指目的和手段都相调谐;竞争,是指目的相调谐,但手段不调谐;协作,是指手段相调谐,但目的不调谐;冲突,是指目的和手段都不相调谐,如图 F. 23 所示。这些也就是社会系统内部各种对立趋势之间的互动所可能采取的几种方式。

尽管每个趋势都试图将一个系统拉向自己所希望的方向,但是为达到该系统的目的(end),对立趋势的存在也是必需的。对立趋势

之间的相互依赖使得任何一种趋势对另一种趋势的胜利(优势)都包含着致使系统毁灭的种子。这样,辩证关系是指存在于那些具有同一高层次目标(objective)的各趋势之间的冲突。它是不同手段之间的冲突,而不是不同目的(end)之间的冲突。但是,二分关系是指存在于目的(end)和手段中的冲突,一种零和博弈,一种胜负之争。

手 段 \ 目 的	不 调 谐	调 谐
	调 谐	不 调 谐
调 谐	协作	合作
不 调 谐	冲突	竞争

图 F. 23 目的与手段的关系

只要社会系统的各成员对理想未来持有共同意象并对共同目的持有一致意见,他们就能处在彼此互惠的关系之中,对立趋势之间的互动并不导致一方遭受挫折,另一方稳坐泰山的局面。那种情况只有在不同趋势之间关系为二分关系时才会出现。

另一方面,应当认识到这样的事实,即目的(end)和手段是一对可互换的概念;一个目的是下一个目的的手段。为了将二分冲突转变为辩证冲突,必须找出低层次冲突趋势所共有的高层次目标。这样,就可以将低层次的对立目的转换为冲突手段,而这些手段具有共同的高层次目的;以此继续推演,最后可达到理想层次,在那里目的和手段汇合在一起并达到一致。找出共同目标的概率随着层次的不不断升高而增大,在理想层次上达到极大。如果理想层次也不能为冲突趋势提供共同目的,那么这种冲突就被看作是在现存世界观的范围内所无法消除的冲突。为消除这种冲突就必须改变世界观。

总之,社会系统设计者应当正确地把握对立趋势之间的“与”关

系,将胜/负之争转变为胜/胜战略,使社会系统有目的地朝着分化和整合的更高层次转变。

F.5.5 公文俊平的社会系统理论

日本公文俊平在《社会系统理论》(1978年)和《网络社会》(1988年)中,从一般系统理论出发阐述了他的社会系统理论,并考察了现代社会中的诸多问题。

公文俊平认为,近现代社会的框架是“主体”和以主体为要素的“社会系统”。这样,他在社会系统理论研究所作的重要工作是对主体、社会系统以及与此有关的概念给出适当的定义,并在此基础上考察社会系统的进化。下面所介绍的是他所讨论的基本概念和他所提出的基本观点。

1) 主体及其行为

作为近现代人的模型,所谓主体,是“精神”与“肉体”的统一体。这里,“精神”是指认识世界、评价世界并决定对世界的作用方式的能力,而“肉体”是指改变世界状态(至少是部分地)的能力。在现实世界中,个人和各种社会集团(企业、政党、国家等)在某种程度上都具有可视为主体的适当性质即主体性。

主体把自己所要实现的世界状态(尤其是其中作为主体作用对象的“客体”的状态)设定为自己的“目标”,并要通过某种“手段”加以实现。这就是主体的“行为”。这里所说的手段,则是一旦被主体“使用”,便对客体产生某种“作用”的事物。

主体周围的世界(尤其是其中的客体)不仅受到主体所使用的各种手段的作用,还受着属于“环境”的各种事物的作用(外部作用)。这些作用导致世界状态的变化。这里,“环境”是指在主体周围的世界中除“客体”以外的部分。以上所述的各概念之间的关系如图F.24所示。

2) 相互行为与相互控制

当存在多个主体,他们各自发出行为时,某一主体的行为不仅对客体起作用,而且对环境也产生副作用。结果,其他主体的行为就有可能受到因该主体的行为而产生的外部作用。各个主体

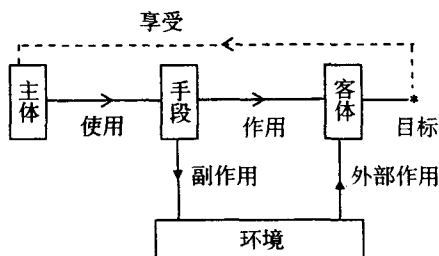


图 F.24 主体及其外部世界

知道自己的行为对其他主体产生这种外部作用,这就需要在发出行为时要预先考虑其他主体的状态和行为的可能变化。这样,各主体的行为就成为“相互行为”即互动。在相互行为中,以对对方主体的行为产生影响为目标的称为“相互控制”,以主体相互之间共有信息和知识为目标的,称为“通信”。

因此,一个主体为圆满地达到自己的目标,必须做到:(1)确切地认识客体的状态、自己所要达到的目标、为此所需的手段及其使用方法以及环境的状态;(2)充分掌握可资使用的各种手段;(3)具有能把握作为一种客体的其他主体的行为控制到某种程度的能力(知识和手段)。

在社会系统中,根据行为的内容可区分三种行为:“经济行为”是指主体以与己有用手段的获取和管理为直接目标的行为;“政治行为”是指以对其他主体行为的控制为直接目标的行为;“文化行为”是指多个主体之间以共有世界解释的共同框架为直接目标的行为。

3) 社会系统

以主体和相互行为概念为基础,可以定义“社会系统”。所谓“社会系统”,是多个主体以共同的文化为基础,通过恒常的定型的有规则的相互行为,彼此结合而形成的一个整体。

社会系统可分为两类。一类是“复合主体”,是“以主体为其要素

的主体”，它本身亦可视为一个主体。例如，在社会科学的组织理论中所说的“组织”就是一种复合主体。复合主体一方面承认要素主体的主体性，另一方面对要素主体施加某种制约，设定复合主体的整体目标，并为实现这个目标而对各要素主体的行为进行调节。

另一类是“非主体型社会系统”，它本身不能视为一个主体。因此，它并不设定自己的目标，也不为实现自己的目标而做出行为。一个典型例子是市场。在市场中，作为其构成要素的各主体的供求关系是由“看不见的手”来自动调节的。这种行为不同于主体的有目的的行为，它是一种机制即市场机制起作用的结果。或者说，为达到自己的目标而做出的各要素主体的相互行为导致了那种结果。

另一方面，根据权力和行为的不同类型，社会系统可分为三类。其一是主要立足于主体权（主权）和胁迫—强制型相互控制的社会系统，如作为复合主体的国家、作为非主体型社会系统的国际社会等。其二是主要立足于所有权和交易型相互控制的社会系统，如作为复合主体的企业、作为非主体型社会系统的市场等。其三是主要立足于信息权和说服—诱导型相互行为的社会系统，如作为复合主体的网络组织、作为非主体型社会系统的超网络系统等。

4) 关于近代化三个阶段的假说

公文俊平用以上的概念考察了近代化的历史过程。他的基本假说如下所述。

在近代化之前已经大量存在着复合主体型社会系统。近代化社会的特征在于它的双层结构，即新型复合主体的出现和以此为要素的大型非主体型社会系统的形成。以非主体型社会系统为活动场所，复合主体之间广泛进行“社会博弈”。所谓“社会博弈”，是指各主体之间为提高自己的相互控制能力而进行的竞争，它在不同时期、不同情况下有不同的中心内容。近代化社会的三个发展阶段可视为出现新的复合主体—社会系统—社会博弈的组合并逐步取代旧的复

合主体—社会系统—社会博弈的组合的过程。

近现代化的第一阶段始于 15 世纪,当时产生了立足于依靠军事—航海革命而实现的技术突破和主权观念的新型复合主体即近代主权国家。第二阶段始于 18 世纪末,当时产生了立足于依靠产业革命而实现的技术突破和所有权观念的新型复合主体即近代产业企业。现在,社会正处在走向近现代化第三阶段的过渡时期,开始出现立足于依靠信息革命而实现的技术突破和信息权观念作为一种网络组织的新型复合主体即小团体网络。这三个阶段的其他特征可参看表 F. 2。

在这些讨论的基础上,公文俊平还对私人电脑通信、网络社会的特征以及网络社会的任务等问题发表了自己的见解。他认为:在 20 世纪末和 21 世纪,人们将继续探讨以信息服务产业为核心的新型产业结构和立足于此的新型生活方式。同时,财富博弈和知识博弈的互补与共生关系将得到发展。另一方面,随着威力博弈失去社会上的正统性,主权国家和民族国家的作用将下降,地方自治体制的作用将增强。并且,人们将在超越各主权国家范围的地区一体化、覆盖整个世界的超国家的世界统治机构及地球管理机构的创设等方面进行摸索。

表 F. 2 近现代社会三个发展阶段(假说)

	复合主体	基本权	相互控制 基本形式	社会系统	社会博弈
第 1 阶段	主权国家	主 权	强制—胁迫	国际社会	威力博弈
第 2 阶段	产业企业	所有权	交 易	世界市场	财富博弈
第 3 阶段	小团体网络	信息权	说服—诱导	全球网络	知识博弈

系统理论在社会科学中的应用和发展并非限于上述几种。例如,多伊奇(Karl Wolfgang Deutsch, 1912—1992)和伊斯顿(David

Easton, 1917—)将系统理论应用于政治系统研究,为政治学发展提供新的视野,受到人们广泛重视。在国际关系研究中,系统理论也备受重视,形成了颇有影响的“体系论”(显然,这是“系统理论”的另一种译法)学派。“西方学术界普遍认为,自 20 世纪 50 年代以来,体系论成为国际关系理论的一个研究重点和核心概念,这一方法为国际关系理论的发展提供了可靠的基础。”^①

F.6 以哲学为背景的系统理论

对系统问题的哲学探讨,产生了所谓系统哲学、系统观或系统思想。这里介绍拉兹洛、邦格(Mario Augusto Bunge, 1919—)和一些马克思主义哲学家的工作。

F.6.1 拉兹洛的系统哲学

在对一般系统理论进行长期研究的基础上,贝塔朗非曾试图建立一种新哲学,并称之为系统哲学。如在本书 2.3.1 所述,他为系统哲学的研究提出一些纲领性意见,认为系统哲学要研究系统本体论、系统认识论、价值观和人本主义等问题。但他并没有系统地展开他所倡导的系统哲学。

拉兹洛在贝塔朗非所指出的系统研究方向上建立了系统哲学体系,而他的工作受到贝塔朗非的赞赏。

在拉兹洛看来,系统哲学的材料来自经验科学,问题来自哲学史,而概念则来自现代系统研究。

他把系统哲学当作一种综合哲学来倡导。他认为现代哲学需要从分析哲学回归到综合哲学。综合哲学的兴起有内部和外部原因。

① 倪世雄等. 当代西方国际关系理论. 上海:复旦大学出版社, 2001. 327

分析需要把研究对象特化为较狭窄的孤立领域,但世界并不是由许多孤立碎片组成的;我们是相互关联的自然系统的一部分,但是现代西方哲学满足于讨论抽象的概念问题、语言问题和预先假定。分析哲学墨守成规,不结果实,只有新的综合哲学才能使哲学摆脱这种困境,为认识世界的本来面目做出贡献。

拉兹洛希望系统哲学能产生一种语言,来统一现在被专门化的概念和词语分离的各门学科。这一任务实际上是一个古老的哲学问题。柏拉图的共相哲学、亚里士多德的范畴理论、中世纪的经院哲学以及伯格森、摩尔根(Conwy Lloyd Morgan, 1852—1936)、亚历山大(Samuel Alexander, 1859—1938)、怀特海的现代过程哲学都试图解决这个问题。从哲学发展史上看,系统哲学是有能力完成这一任务的合乎逻辑的新阶段。拉兹洛试图重新整合“共相”概念和“系统”概念。

拉兹洛把“等级”概念当作一个在一切领域(包括无机界、有机界、社会以及整个宇宙)起作用的共相原理。他根据等级概念得到一个观察整个宇宙的框架,从而构造了整个宇宙的系统等级(包括微观等级与宏观等级)。在此基础上他要建立包容整个世界的系统哲学。在他看来,这个哲学也是按照等级组织的,并且与整个宇宙的等级秩序相对应。他用被他称为“系统—控制论”的概念作为描述手段,提供关于物理系统、生物系统、社会系统、认知系统以及精神理论的有序观点,由此提出他的系统哲学框架,其中包含本体论、自然哲学、精神哲学、认识论哲学、关于人类自由的哲学、规范的伦理学、新的时代精神以及新的形而上学。

在方法论上,系统哲学主张所谓透视法。拉兹洛指出,从总的趋势看,当前的科学思想正在从经验—想象方法转向演绎上的公理化方法。这个转变起因于牛顿力学的崩溃。他认为,物理理论既不是对经验事实的描述,也不是基于经验事实的演绎结果,而是如爱因斯

坦所说,物理理论的建立靠的是物理学家的思辨。不幸的是,哲学家们仍然将科学理论的形成看作是由归纳到演绎的过程。因此,现在所需要的是一种创造性演绎,一种创造性想象,如在爱因斯坦的相对论、托·摩尔根的基因理论和汤川的介子理论中所看到的那样。系统哲学强调不同领域规律的同型性,试图创造出一种素有训练的奔放不羁的想象力。科学所建立的是世界的第一级模型,而系统哲学则要从由科学所构造的各种理论中取得资料,建立世界的第二级模型。第一级模型所表示的是实在,而实在一般是有序的;特殊科学所描述的特殊秩序可以综合到系统哲学所描述的普遍秩序中去。

F.6.2 邦格的社会系统主义

加拿大哲学家邦格在“社会系统概念:超出个体主义和整体主义”(1979年)一文中考察了关于社会本质的三种基本观点,即个体主义、整体主义和系统主义。他概括地叙述了这三种主义的本体论方面和方法论方面。

1) 个体主义

它的本体论认为:(1)社会是人类个人的集合,超个人的总体是观念上的而不是具体的。(2)社会总体是抽象观念,因而不具有总括的或突现的性质,每一种社会性质都是各社会成员性质的组合或聚集。(3)不存在系统性,因此社会不能对任一成员起作用,团体压力是其成员所产生压力的总和。两个社会间的互动存在于其个别成员间的互动中,而社会变化是社会个别组元变化的总体。

个体主义的方法论认为:(1)对社会的正确研究便是对个人的研究。(2)对社会事实的最终解释必须根据个人行为。(3)社会学的假设和理论要靠对个人行为的观察来检验。

2) 整体主义

它的本体论认为:(1)社会是超越其成员的总体。(2)社会具有

格式塔性质或总括性。这些性质是突现的,即不能还原为个人的任何性质。(3)社会对其成员的作用大于这些成员对社会的作用。两个社会间的互动是整体对整体的事件。而社会变化是超个人的,尽管它对社会个别成员有影响。

整体主义的方法论认为:(1)对社会的正确研究便是对其总括性及变化的研究。(2)社会事实可由超个人的整体(如国家),或超个人的力(如民族的命运)来解释。个人行为可由有关个人和整个社会对此个人的作用来理解(尽管它也许是不可解释的)。(3)社会学假设与理论不是超越经验的检验(反科学的整体主义),就是由社会学和历史的资料中得以检验(与科学有关的整体主义)。

3) 系统主义

它的本体论认为:(1)社会既不是个人的单纯聚集,也不是超个人的统一体,它是一个由相互关联的个人组成的系统。(2)社会是一个系统,因此它具有系统性或总括性,这些性质中有些是组合的或可还原的,而另一些是突现的——它们基于个人及其相互影响,但并不表示个人的特性。(3)社会不能对其成员起作用,但社会团体的成员可分别对单个个人起作用,而每一个人的行为不仅依赖于其遗传特性而且依赖于他在社会中的角色。两个社会间的相互作用是个人对个人的事件,其中每个人在其社会中都居于确定位置。而社会变化是社会的社会性结构的变化,因此是在社会层次和个人层次上的变化。

系统主义的方法论认为:(1)对社会的正确研究,是对与社会有关的个人特征的研究,同时又是对社会整体的性质和变化的研究。(2)对社会事实的解释必须根据个人和团体以及它们的相互作用。个人行为可由社会性个人的全部特性,即生物的、心理的和社会的特性来解释。(3)社会学假设和理论要由社会和历史资料来检验。但是这些资料都建立在有关个人和小团体的资料基础上。

邦格由此认为个体主义和整体主义是错误的,因为前者忽略社

会的任何突现性质,而后者拒绝说明这些性质。系统主义则没有这些缺陷,它把上述两种观点的合理部分,尤其把个体主义的精明而讲究实际的观点和整体主义的强调总体和突现的观点结合在一起。

邦格从形式上把社会定义为:社会 σ 是一个有序三元组(σ 的组元, σ 的环境, σ 的结构)。这里, σ 的结构是 σ 的组元之间诸关系的聚合。据此,他从数理逻辑上展开了他的观点。

邦格进一步认为,系统观点现在不仅支配着理论社会科学家的思想,而且支配着应用社会科学家的思想,以及那些富有想象力的大社会系统(如工业联合企业、政府组织)管理者的思想。当研究目的在于检查或改进社会系统管理时,要采用下列四个步骤来解决问题:(1)认定社会的组元、环境和结构;(2)揭示系统的状态变量,至少是其输入和输出;(3)假设状态变量之间的确切关系;(4)对于这些假设,或者在电子计算机上进行模拟,或者在经验中进行检验。

F.6.3 一些马克思主义哲学家的系统观点

在过去的几十年,一些马克思主义哲学家对系统理论中的哲学问题也作了不少研究。除了克劳斯、萨多夫斯基、乌约莫夫、库兹明 В. П. Кузьмин 等人的研究外,瓦恩科(C. Warnke)等人的研究相当引人注目。

瓦恩科等人在《马克思主义的社会辩证法还是‘社会系统理论’?》(1977年)一书中通过探讨系统思维与唯物辩证法之间的关系,试图在唯物辩证法中把系统思维放在适当位置上。

1) 两种倾向

瓦恩科认为,围绕系统思维存在着两种倾向。其中一个倾向出现于20世纪60年代初,它试图把系统思维的概念与命题在不同程度上与唯物辩证法的概念与命题等量齐观,毫无批判地以系统科学的概念替换哲学概念。例如,克劳斯的把唯物辩证法和历史唯物主

义控制论化的倾向属于此。另一倾向是出现在西德的新哲学。它的代表人物是罗姆巴赫(Heinrich Rombach, 1923—2004), 他根据“结构”和“功能”概念, 试图以“结构存在论”克服以往的存在论, 即他所说的“实体存在论”。但是, 这一哲学把对象的一切实体性、一切自在之有都取消为“为他之有”、功能性和关系性。卢曼(Niklas Luhmann, 1927—)的社会系统理论是与罗姆巴赫的“结构存在论”同时(1971年)出现的。他同样在“结构”与“功能”中寻求其概念基础, 他自己也承认这是一种反对历史唯物主义的计划。

瓦恩科写道:一方面, 一些马克思主义哲学家认为, 可以用系统思维概念使唯物辩证法范畴体系和规律得以丰富、精确化和具体化; 另一方面, 从同一个系统思维概念出发产生了一种新哲学, 但它不是唯物主义的而是唯心主义的, 不是辩证法的而是关系主义的。鉴于这两种值得注意的情况, 我们有必要更深入地研究辩证法与系统思维在思维方式、概念及命题方面的关系。

2) 黑格尔关于系统思维地位的观点

瓦恩科认为:在黑格尔那里, 所谓“自在之物”(被当作实体存在论的对象), 即自在之有(das An-sich Sein)的物, 不过是单纯的抽象物, 各种性质才是独立的东西。各种性质是为他之有(das Sein-für Anderes), 属于多、变化、交替、区别的领域, 总之是现象领域。但是, 为他之有也是抽象的, 而自在之有和为他之有的统一才是辩证法, 二者的真理是作为自在自为之有(das An-und-für-sich Sein)的本质。但是, 黑格尔认为, 自在自为之有的世界是现象的世界颠倒过来的。就是说, 凡是在现象的世界中是肯定的东西, 在自在自为之有的世界中便是否定的; 反过来, 凡是在前一世界中是否定的东西, 在后一世界中便是肯定的。本质和现象形成相对独立的世界。本质世界是自在自为之有的总体, 而现象世界是为他之有的总体。

她进一步指出:从辩证法的观点看, 就能确定可以用系统科学把

握的所谓结构—功能的联系与规律所处的领域乃是现象领域。现象领域在黑格尔那里并非处于各事件的无规则的混乱状态,而是有规律性的,那就是黑格尔所说的“现象的规律”。但在黑格尔那里,“规律”与“本质”是不同的,在现象的规律中总体尚缺乏本质这一其“根据”的侧面。换言之,在这个研究阶段,总体仅仅被看作是结构,或者是卢曼所定义的系统即抽象意义上的系统。总之,在黑格尔看来,系统思维所处的位置是“现象的规律”。以上内容可示如图 F. 25。

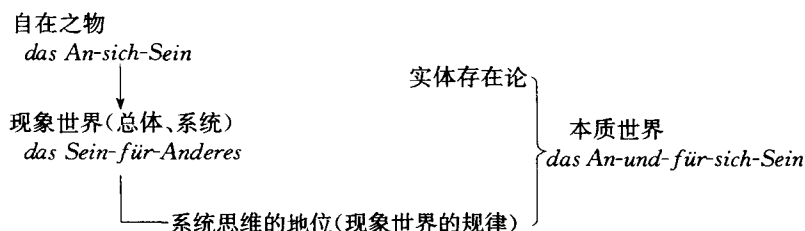


图 F. 25 瓦恩科对于黑格尔的理解

3) 马克思关于系统思维地位的观点

瓦恩科在对黑格尔作了上述分析后,根据马克思的《经济学手稿》考察了马克思的思想。她指出,马克思直截了当地认为流通的特点是为他之有,因而是眼前被视为似乎没有任何规律性的现象。在马克思看来,在流通中“我的产品只有对别人[为他地]成为产品,才是产品;也就是说,只有成为被扬弃的个别,成为一般,才是产品。……别人只有把他自己的产品转让出去,我的产品对他[为他地]才是产品”^①。他又用“表面的过程”、“直接存在于资产阶级社会表面上的东西”、“在背后进行的一种过程的表面现象”等用语描述了交换领域。同黑格尔一样,马克思进而把眼前被视为似乎没有规律性的交换领域看作具有它本身的规律的相对独立的领域。

^① 马克思恩格斯全集(第46卷)。北京:人民出版社,1979。145

接着,瓦恩科指出,在流通中,参与交换的每个人都是商品所有者,他们既是买者同时又是卖者,具有这两种相互对立的规定性。可是,虽说既是买者又是卖者,但因其地点和时间不同,这里所说的两个对立的规定还是相互无关的,尚不构成矛盾关系。因此,在现象层次上,矛盾不能看作辩证法所说的矛盾。在这一层次上并不出现矛盾运动、对立物的相互过渡和对立物的同一性,所出现的只是固定的互无关系的各要素的非同一性,单纯的功能更替。总之,现象的流通世界作为总体被看作是功能更替的系统。只有从现象世界的抽象总体过渡到更高更总括的即具体的总体时,才出现真正的辩证法领域即本质与根据的领域。但是,本质与根据的领域并非展现在现象领域的彼岸;本质表现为现象。所谓根据,是以赋予根据者为中介的。流通在它自身中并不具有自我更新的原理,就其本身而言,它终究要停止的。流通的各环节,是预先给定并被作为前提的,但是不能靠它本身而被设定的。“它是在背后进行的过程的现象”^①,而背后进行的过程,则在运动和不断的自我更新中保持它本身及流通。流通世界的根据是生产领域。

瓦恩科结论说,马克思称为交换或流通领域的社会生活领域,就是系统思维领域。也就是说,马克思用系统思维的概念和方法研究了社会各系统的、关于社会各系统的各种交换关系。她的这一理解见图 F. 26:

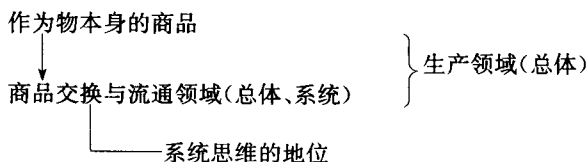


图 F. 26 瓦恩科对于马克思的理解

① 马克思恩格斯全集(第 46 卷). 北京:人民出版社,1979. 209

总之,如图 F. 27 所示,在瓦恩科看来,在辩证法中,系统思维所处的哲学领域是现象领域,系统思维所揭示的是现象的规律;在经济学上,系统思维所揭示的是交换与流通领域的规律。

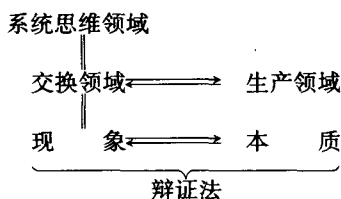


图 F. 27 瓦恩科关于系统思维在辩证法中所处地位的结论

日本哲学家岩崎允胤认为,无论是对系统思维的取消主义的虚无主义的态度还是过高地评价系统思维,甚至试图用系统思维取代或推翻辩证唯物主义和历史唯物主义的作法,都是错误的。哲学研究者需要从唯物辩证法的观点出发,批判地讨论系统思维的意义和限界。

在辩证法与系统思维的关系上,岩崎允胤在原则上赞同瓦恩科等人的观点。他指出:系统思维无论如何也不可能直接地把握研究对象的内在本质(它的运动发展的规律)。系统思维充其量也只能表示对象的一定功能联系或功能的结构联系。

岩崎允胤对瓦恩科的一些观点提出了异议。例如,在瓦恩科看来,系统思维同现象规律的认识有关系。岩崎允胤则指出:系统思维并不是与现象规律一般有关的,问题在于系统思维与哪些类型的现象规律有关,换言之,系统思维在哪些限定条件下在哪些侧面上与现象规律有关。这正是在与部门科学的关系上系统思维所面临的当前特别需要解决的问题。

* * * * *

以上,我以几乎不加任何评论的方式介绍了系统科学研究中出

现的各种系统(理)论。我并不认为这里的介绍是包罗无遗的,某些重要的理论(如复杂适应系统理论、复杂网络理论、自创生理论等)未被介绍,我也不认为对每一种系统(理)论的介绍是完全准确的,也许会有对某些理论的不准确的或错误的介绍。同时,我并不认为这里介绍的每一种理论都是完全正确的,实际上每个人都在探索,包括这些理论的创始人在内。但是,无论怎样,从以上的资料中我们可以了解到系统(理)论界历史和现状的大致情况,并且能感受到系统科学的繁荣景象。

贝塔朗菲曾把一般系统理论当作实现科学统一的一个重要步骤。的确,系统研究在实现科学统一方面已经和正在做出自己的贡献。但是如同我所介绍的那样,随着系统运动的兴起产生了各种各样的系统(理)论,而这些系统(理)论的统一业已成为重大的科学问题和哲学问题。本书只是我在这方面的一个尝试。我期待着更多的以“系统学”为书名的学术著作问世。

参 考 文 献

本书的写作参考了大量的文献。这里列出其中主要部分。除了他人的论著外,我自己的有关论著也列入参考文献之中(除《系统学基础》第一版外)。全部文献先按各章节内容编排,在同一章节内则按人名英文字母(或汉语拼音字母)顺序编排。

本书向读者提供了书中出现的大多数外国人的外文全名和生卒年。考虑到其中相当多的内容尚无中文资料,这是一件非常艰巨但又非常有意义的事情。我相信,读者利用这些资料可以非常方便地在因特网上查找有关文献。

此外,在本修订版的准备过程中,我发现过去的十多年里有不少我所认识的或不认识的系统科学界前辈已经与世长辞,觉得百感交集。惟一使我感到欣慰的是,他们的论著仍然经常出现在日益增多的系统科学领域出版物的参考文献中。值此,我也愿以这本微不足道的著作表达对他们的怀念之情。

第一章 系统学的历史发展

1.1 系统学与系统论

Ackoff R L. *Creating the Corporate Future*. New York: John Wiley & Sons, 1981

Bertalanffy L v. *Problems of Life*. New York: Wiley, 1952

Bertalanffy L. v. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968

Bunge M. A Systems Concept of Society: Beyond Individualism and Holism. In: *General Systems*, Yearbook of the Society for General Systems Research. 1979. Vol. 24

恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971

李俊炯(音). 系统:理论与应用(韩文). 仁川:仁荷大学出版部, 2000

朴昌根. 试论一般系统论及其历史发展. 北京:全国第一届自然科学方法论研讨会论文,1980

朴昌根. 系统时代与一般系统论. 自然辩证法报,1981.(8)

朴昌根. 一般系统论及其早期发展. 苏州:全国近现代技术史研讨会,1981

朴昌根. 贝塔朗菲与他的一般系统论. 长沙:全国系统科学与辩证法研讨会,1985

(东亚传统科学在理论上长期落后于西方的原因,是我一直关心的问题之一。我试图在东西方科学思想的比较中考察这一问题。这方面的工作,参看下列文章)

朴昌根. 韩国传统科学的历史发展. 1984. 见:王国忠(主编). 李约瑟研究第一辑. 上海:上海科学普及出版社,2000

朴昌根. 阻碍中国人获得诺贝尔奖的若干因素之浅析. 见:陈其荣等(主编). 理性与情结. 上海:复旦大学出版社,2002;后补充一些内容,以“阻碍中国人和韩国人获得诺贝尔奖的若干因素之浅析”为题,刊于:朴昌根. 全球化与韩国的应对. 2003

朴昌根. 韩国金属活字印刷术的历史发展. 见:王国忠(主编). 东西方科学文化之桥. 北京:科学出版社,2003

朴昌根. 韩国传统医学的历史发展. 见:全球化与韩国的应对.

汉城:白山资料院,2003;东医发展史略(编辑部审定稿). 医古文知识,2004. (2)

朴昌根. 从与西方传统科学的比较看东亚传统科学的走向(韩文). 见:全球化与韩国的应对. 汉城:白山资料院,2003;从与西方传统科学的比较看东亚传统科学的走向(韩文,编辑部审定稿). 科学思想(韩国),2003(夏季号)

朴昌根. 东方传统科学的命运(摘要). 上海:上海市科技史学会 2003 年年会,2003

朴昌根. 东西方“系统思想”之比较(摘要). 上海:上海市科技史学会 2004 年年会,2004

朴昌根. 东西方科学之比较. http://www.survivor99.com/pscience/befor20041215_gaojian/pcg00.doc

1.2 系统学与信息产业革命

Bahm A J. Five Systems Concepts of Society. In: *General System*, Yearbook of the Society for General Systems Research, 1983—1984. Vol. 28

Bertalanffy L v. Zu einer allgemeinen Systemlehre. *Biologia Generalis*, 1949. (19);关于一般系统论. 自然科学哲学问题丛刊, 1984. (4)

丹皮尔 W C. 科学史及其与哲学和宗教的关系. 北京:商务印书馆,1979

李继宗等. 系统·信息·控制. 上海:华东师范大学出版社,1990

李少白(编). 科学技术史. 武汉:华中工学院出版社,1984

朴昌根. 贝塔朗菲的一般系统论简介(“系统学”研究参考资料之一). 上海:上海机械学院系统工程研究所,1982

朴昌根:论人机系统发展的三段模式. 科学、技术与辩证法,

1985(4)

山崎俊雄(編). 現代自然科学入門. 東京:有斐閣,1967

申农 C E. 通信的数学理论. 见:上海市科学技术编译馆(编). 信息论理论基础. 上海:上海市科学技术编译馆,1965

王雨田(主编). 控制论、信息论、系统科学与哲学. 北京:中国人民大学出版社,1986

维纳 N. 控制论. 北京:科学出版社,1963

钟义信. 信息科学原理. 福州:福建人民出版社,1988

竹村伸一. 系统技法手册. 北京:宇航出版社,1988

1.3 系统学史略

Bahg C - G(朴昌根). Major Systems Theories Throughout the World, *Behavioral Science*, 1990, 35(2): 79—107

Bertalanffy L v. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968

李曙华. 从系统论到混沌学. 桂林:广西师范大学出版社,2002

朴昌根. 国外系统理论研究(上,中,下). 自然辩证法研究,1986 (1,2,3)

朴昌根. 系统科学及其在中国的研究现状. 见:韩国高丽大学行政问题研究所. Research Paper. 1995 No. 95—1

(全球化时代与系统学的关系,见下列三篇文章)

朴昌根. 全球化与中国的应对. 香港:亚洲研究,2002. 44

朴昌根. 全球化与韩国的应对(韩文). 栗谷正论(韩国),2002. 4

朴昌根. 全球化、中韩两国的应对与合作. 见:青岛大学法学院韩国研究中心,中国朝鲜研究会(编). 交流、沟通、全球划时代的中韩关系. 2002

(传统与现实的碰撞,以韩国为例. 参看下列五篇文章,均刊

于:朴昌根. 全球化与韩国的应对. 汉城:白山资料院,2003)

朴昌根等. 论韩国人的传统社会价值观对韩国企业经营价值观的影响

朴昌根等. 论韩国人的权威主义价值观对韩国政治民主化与经济现代化的影响

朴昌根. 论韩国人的家族中心主义价值观对韩国社会政治·经济·经营现代化的影响

朴昌根. 论韩国人的因缘主义价值观对韩国社会政治·经济·经营现代化的影响

朴昌根. 论韩国人的尚文主义价值观对韩国社会政治·经济·经营现代化的影响

Ragade R K(ed). *General Systems*, Yearbook of the Society for General Systems Research, 1983—1984. Vol. 28

Society for General Systems Research. *An Invitation of the Society for General Systems Research*. 1986

第二章 什么是系统学

Bahg C - G(朴昌根). Major Systems Theories Throughout the World, *Behavioral Science*, 1990, 35(2): 79—107

Bertalanffy L v. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968

Klir G J(ed). *Trends in General Systems Theory*. New York: Wiley, 1972

李继宗等. 系统·信息·控制. 上海:华东师范大学出版社,1990

苗东升. 系统科学精要. 北京:中国人民大学出版社,1998

朴昌根. 系统方法的几个基本原则. 见:中国自然辩证法研究

- 会筹委会(主编). 科学方法论研究. 北京: 科普出版社, 1983
- 朴昌根. 科学知识的等级结构. 自然信息, 1984. (2)
- 朴昌根. 论系统科学体系. 系统工程理论与实践, 1985. (2)
- 朴昌根. 系统科学体系初探. 王应洛, 黄麟雏(主编). 系统思想与科学技术发展战略研究. 西安: 西安交通大学出版社, 1985
- 朴昌根. 系统科学论. 西安: 陕西科技出版社, 1988
- 朴昌根. 论同型性与创造. 自然辩证法研究, 1989. (6)
- 朴昌根. 系统学的研究对象、内容与方法. 上海: 全国第一届系统学研讨会, 1990; 上海机械学院学报, 1991, 第 13 卷增 1 期
- 朴昌根. 奇妙的“4”. 上海科学生活, 1991. (5)
- 朴昌根. 什么是系统学(韩文). 汉城: 1999 年世界科技大会, 1999; 科学思想(韩国), 2002(冬季号); 什么是系统学. 见: 于华夫(主编). 科学中国人优秀论文集(1). 北京: 中国社会出版社, 2000
- 朴昌根. 同型性、系统与系统论的历史发展(韩文). 见: 科学与哲学(韩国), 1995(6)
- 朴昌根. 对系统学研究中若干基本问题的反思. 作者原稿. 见: 全球化与韩国的应对; 编辑部审定稿. 系统辩证学报, 1999. (4)
- 钱学森等. 论系统工程. 长沙: 湖南科技出版社, 1982
- 市川惇信. 系统科学. 世界科学, 1981. (10)
- 许国志(主编). 系统科学. 上海: 上海科技教育出版社, 2000
- 许国志(主编). 系统科学与工程研究. 上海: 上海科技教育出版社, 2000

第三章 系统概念

3.1 什么是系统

李继宗等. 系统·信息·控制. 上海: 华东师范大学出版

社,1990

朴昌根. 系统学(韩文). 汉城:泛洋社出版部,1997

萨多夫斯基 瓦尼. 一般系统论原理. 北京:人民出版社,1984

乌约莫夫 A И. 系统方式和一般系统论. 长春:吉林人民出版社,1983

邹珊刚等. 系统科学. 上海:上海人民出版社,1987

3.2 结构与功能

Bertalanffy L v. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968

公文俊平,高原康彦(編):一般システム研究の成果と展望. 横浜:日本 GSR 研究会,1987

クラウス G. サイバネティックスと社会科学,東京:合同出版,1978

朴昌根. 系统学的若干基本概念(“系统学”研究参考资料之二). 上海:上海机械学院系统工程研究所,1982;大连:全国系统科学与现代化建设学术讨论会,1983

朴昌根. 系统科学论. 西安:陕西科技出版社,1988

朴昌根等. 韩语及其文字的特点. 见:朴昌根. 全球化与韩国的应对. 汉城:白山资料院,2003

3.3 子系统与分系统

Büchel A 等. 系统工程(上). 上海:上海机械学院系统工程系,1983

Miller J G. *Living Systems*. New York: McGraw - Hill, 1978

朴昌根. 系统学(韩文). 汉城:泛洋社出版部,1997

第四章 系统分类

- 邓聚龙. 灰色系统(社会·经济). 北京:国防工业出版社,1985
- 邓聚龙. 灰色控制理论. 武汉:华中工学院出版社,1985
- Флейшман Б С. Основы Системологии. М: Радио и Связь, 1982
- 朴昌根. 系统分类学初探(上,下). 系统工程. 1987. (1,2)
- 朴昌根. 谈谈模糊工程学. 自然信息,1980. (2)
- 浅居喜代治等: あいまいシステム理論入門. 東京: オーム社,1978
- Rosen R. 科学的モデルとはなにか. 科学(日本),1983. (10)
- Rosen R. *Anticipatory Systems*. Oxford: Pergamon Press, 1985
- 涂序彦. 大系统理论的对象、内容和方法. 见: 中国科学普及部. 系统工程普及讲座汇编(上), 1980
- 喻学恒. 系统工程理论与应用(第一卷). 武汉: 武汉大学出版社,1983

第五章 系统性质

5.1 整体性

- Bertalanffy L v. *Problems of Life*. New York: Wiley, 1952
- Bertalanffy L v. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968
- 朴昌根. 论系统质的规定方式和量变质变规律研究中的若干问题. 求索,1987. (2)
- 朴昌根. 系统科学论. 西安: 陕西科技出版社,1988

朴昌根. 系统学(韩文). 汉城:泛洋社出版部,1997

5.2 稳定性

Arnold V I. *Catastrophe Theory*. New York: Springer - Verlag, 1986

Chow S - N, Hale J K. *Methods of Bifurcation Theory*. New York: Springer - Verlag, 1982

Faurre P, Depeyrot M. *Elements of System Theory*. New York: North - Holland, 1977

桑德斯 P T. 灾变理论入门. 上海:上海科技文献出版社,1983

5.3 等级性

Bertalanffy L v. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968

Klir G J(ed). *Trends in General Systems Theory*. New York: Wiley, 1972

Mesarovic M D. : *Views on General Systems Theory*. New York: John Wiley, 1964

5.4 适应性

杜布赞斯基 T. 遗传与物种起源. 北京:科学出版社,1953

格洛里索 R M. 工程控制. 北京:科学出版社,1981

坎农 W B. 躯体的智慧. 北京:商务印书馆,1980

Laszlo E. *Introduction to Systems Philosophy*. New York: Jordon and Breach, 1972

5.5 历时性

郝京 S W. 时间的简明历史. 北京:清华大学出版社,1990

瑞斯尼克 R. 相对论和早期量子论中的基本概念. 上海:上海科技出版社,1978

苏汝铿,倪光炯. 物理学中的时间箭头. 自然杂志,1981.(7)

许良英等(编译). 爱因斯坦文集. 北京:商务印书馆,1977

湛垦华,沈小峰等(编). 普利高津与耗散结构理论. 西安:陕西科技出版社,1982

第六章 信息与熵

6.1 系统与信息

艾什比 W R. 控制论导论. 北京:科学出版社,1965

Belis M, Guiasu S. A Quantitative - Qualitative Measure of Information in Cybernetic Systems. *IEEE. Trans. Information Theory* IT - 14, 1968

申农 C E. 通信的数学理论. 见:上海市科学技术编译馆(编). 信息论理论基础. 上海:上海市科学技术编译馆,1965

维纳 N. 控制论. 北京:科学出版社,1963

维纳 N. 控制论与社会. 北京:商务印书馆,1978

伊藤隆. 情報とはなにか. 科学(日本),1980.(1)

钟义信. 信息科学原理. 福州:福建人民出版社,1988

6.2 系统与熵

车宏安等(编). 熵:理论与应用. 北京:中国科学技术出版社,1991

朴昌根,顾国庆(译编). 熵是什么(上,下). 上海:上海机械学院系统工程系,1985

朴昌根. 熵的过去、现在与未来. 兰州:全国第二届熵与交叉科学研讨会,1989

朴昌根. 动力系统熵. 与邵锡华、车宏安合作. 上海:中日熵理论与应用研讨会,1990

朴昌根. 中国におけるエントロピー研究. 名古屋:日本エントロピー学会第九回シンポジウムにおける記念講演,1991

朴昌根. エントロピーとその原理におけるいくつかの問題. えんとりぴい(エントロピー学会誌),1992(24)

曲直. 信息热力学基本问题之一 —— Shannon 熵与 Clausius 熵的统一性. 攀枝花:全国第三次熵与交叉科学研讨会,1991

曲直. 信息热力学基本问题之一 —— Shannon 熵与 Boltzmann 熵的统一性. 同上

曲直. 广义熵的阶与复杂性的层次. 同上

小野周ほか(編). エントロピー. 東京:朝倉書店,1985

小野周ほか(編). 熱学第二法則の展開. 東京:朝倉書店,1990

新疆维吾尔自治区科学技术协会(编). 熵与交叉科学. 北京:气象出版社,1988

薛定谔 E. 生命是什么. 上海:上海人民出版社,1973

张学文. 组成论. 合肥:中国科学技术大学出版社,2003

槌田敦. 資源物理学入門. 東京:日本放送出版協会,1982;資源物理学. 朴昌根译. 上海:华东化工学院出版社,1991

6.3 熵与生命·社会·经济系统

Bahg C - G(朴昌根). *Can mankind extricate itself from the*

dilemma between the economic growth and the environmental pollutions? Seoul: The Sixth Annual Convention. Congress of Political Economists International. , January 5—10, 1995; 见:朴昌根. 全球化与韩国的应对. 汉城:白山资料院,2003. 125—143

Georgescu-Roegen N. *The Entropy Law and the Economic Process*, Cambridge(Mass.): Harvad University Press, 1971

桂木健次. 環境と福祉の経済学. 京都:ミネルヴァ書房,1991

里夫金 杰,霍华德 特. 熵:一种新的世界观. 上海:上海译文出版社,1987

朴昌根. 熵与经济过程中的若干问题. 上海:中日熵理论与应用研讨会,1990. 见:车宏安等(编). 熵:理论与应用. 北京:中国科学技术出版社,1991

朴昌根. 熵与经济发展. 攀枝花:全国第三届熵与交叉科学研讨会,1991. 见:四川攀枝花市物理学会(编). 熵理论的一场大辩论. 成都:四川科学技术出版社,1993

朴昌根. 熵与经济. 自然杂志,1992. (3)

朴昌根. 从系统学看环境问题(韩文). 科学思想(韩国),1995(冬季号)

朴昌根. 生命和系统学(韩文). 汉城大学医学院研讨会讲稿,1995

朴昌根. 在东北亚经济开发中不得忽视的一个问题:环境污染. 见:朴昌根. 全球化与韩国的应对. 汉城:白山资料院,2003

槌田敦. 資源物理学入門. 東京:日本放送出版協会,1982;资源物理学. 朴昌根译. 上海:华东化工学院出版社,1991

室田武. 水土の経済学. 東京:福武文庫,1991

槌田敦,室田武. 生命とエントロピーとの研究の歴史,えんとろぴい(エントロピー学会誌),1985(4)

植田敦. エントロピーとエコロジー. 東京:ダイヤモンド社,1986

第七章 系统进化

7.1 进化论的进化

Bahg C - G(朴昌根). An Outline for Systems Evolutionary Theory. 见:朴昌根. 全球化与韩国的应对. 汉城:白山资料院,2003

达尔文. 物种起源. 北京:商务印书馆,1983

杜布赞斯基. 遗传与物种起源. 北京:科学出版社,1953

郭治安,高伟光. 神经计算机. 成都:四川教育出版社,2001

拉兹洛 E. 进化——广义综合理论. 北京:社会科学文献出版社,1988

马克思恩格斯全集(第46卷). 北京:人民出版社,1979.
102—121

朴昌根. 与李继宗合作. 系统进化论初探. 大连:全国系统科学与现代化建设学术讨论会,1983

朴昌根. 系统进化论:它的定义、内容与应用. 上海:全国新学科研讨会讲演材料,1990

朴昌根. 系统科学第五章. 见:邹珊刚等. 系统科学. 上海:上海人民出版社,1987

普里戈金 I. 从存在到演化. 上海:上海科学技术出版社,1986

韦斯科夫 V F. 科学的前沿与限度. 世界科学译刊,1978.(1)

沃尔德罗普 米. 复杂. 北京:三联书店,1997

杨奇 E. 正在自组织的宇宙(韩文). 汉城:泛洋社出版部,1989

颜泽贤(主编),陈忠,胡皓(副主编). 复杂系统演化论. 北京:人民出版社,1993

胡皓等. 自组织理论与社会发展研究. 上海:上海科技教育出版社, 2002

7.2 若干基本范畴

朴昌根. 系统学(韩文). 汉城:泛洋社出版部, 1997

朴昌根. 从系统自组织与他组织概念看韩国经济发展过程中市场与政府的关系. 见:全球化与韩国的应对, 汉城:白山资料院. 2003;从系统自组织与他组织概念看韩国市场与政府的关系. 亚太经济, 2000(3)

沈小峰, 王德胜. 自然辩证法范畴论. 北京:北京师范大学出版社, 1986

日本物理学辞典編集委員会(編). 物理学辞典. 東京:培風館, 1984

湛垦华, 沈小峰等(编). 普利高津与耗散结构理论. 西安:陕西科技出版社, 1982

Zwicz M. Dialectical Thermodynamics. In: Lasker G E (ed). *Applied Cybernetics and Systems*. 1981, Vol. II

7.3 系统进化方程及其讨论

郝柏林. 分岔、混沌、奇怪吸引子、湍流及其它. 物理学进展, 1983, 3(3):364

格莱克 J. 混沌. 上海:上海译文出版社, 1990

公文俊平, 高原康彦(編). 一般システム研究の成果と展望. 横浜:日本 GSR 研究会, 1987

Haken H. *Synergetics*. Berlin: Springer - Verlag, 1983

Haken H. *Advanced Synergetics*. Berlin: Springer - Verlag, 1983

哈肯 H. 信息与自组织. 成都:四川教育出版社, 1988

李如生. 非平衡态热力学和耗散结构. 北京:清华大学出版社,1986

尼科里斯,普利高津. 探索复杂性. 成都:四川教育出版社,1986

尼科里斯 G 等. 非平衡系统自组织. 北京:科学出版社,1986

朴昌根. 系统科学第五章. 见:邹珊刚等. 系统科学. 上海:上海人民出版社,1987

朴昌根. 系统学(韩文). 汉城:泛洋社出版部,1997

普里戈金等. 从混沌到有序. 上海:上海译文出版社,1987

湛垦华,沈小峰等. 普利高津与耗散结构理论. 西安:陕西科技出版社,1982

7.4 分叉与相变

(理论上的考察)

同 7.3

(以社会系统(主要是韩国)为例,考察结构转变时期一些相关因素的作用)

朴昌根. 论分叉与社会系统进化. 未发表,1988

朴昌根. 走向 21 世纪的韩国产业政策. 开放导报,1995.(3)

朴昌根. “1·5”计划:韩国经济开发战略的转折点. 亚太论坛,1995(6)

朴昌根. 韩国产业政策. 上海:上海人民出版社,1998

朴昌根. 从海外华人资本在中国改革开放中的作用看南北经济合作对朝鲜的影响(韩文). 见:国际韩民族财团. 韩半岛和平共处与民族共同体. 汉城:韩民族论坛出版局,2001

朴昌根. 中国的改革开放与中国社会的变化(韩文). 未发表,2003

朴昌根. 韩半岛战争是否迫在眉睫?(韩文). 韩民族论坛,2003

(夏季号)

朴昌根. 韩半岛统一前景略议. 见:朴昌根. 全球化与韩国的应对. 汉城:白山资料院,2003

7.5 系统进化的方向性及周期性

同 7.3,以及

Bahg C G(朴昌根), Haojie Zhou. Systems Evolution, Structures of Long - Waves, and Systems Management. *World Futures*, 1991,30(4):239—245

库恩 T S. 科学革命的结构. 上海:上海科技出版社,1980

拉兹洛 E. 进化——广义综合理论. 北京:社会科学出版社,1988

Miller J G, Miller J L. The Earth as a System. *Behavioral Science*, 1982, Vol. 27

莫德尔斯基 G. 二十一世纪初的世界政治格局. 世界经济译丛,1986(10)

尼基京 斯. 长波理论与科技进步. 世界经济译丛,1986(1)

朴昌根. 从阿米巴到联合国. 上海:上海市系统工程年会,1986

朴昌根. 从平衡经济学到非平衡经济学. 杭州:全国自组织理论研讨会,1987

朴昌根. 从物质系统有序结构看经济系统有序结构. 系统工程,1988(2)

朴昌根. 论系统进化与长波结构. 见:中国系统工程学会(编). 科学决策与系统工程. 北京:中国科学技术出版社,1990

朴昌根. 从系统进化的周期规律看经济长波、政治长波与科学长波. 见:乌杰(主编). 系统理论与区域规划论文选. 徐州:中国矿业大学出版社,1990

朴昌根. 系统学(韩文). 汉城: 泛洋社出版部, 1997

赵涛. 经济长波论. 北京: 中国人民大学出版社, 1988

沢富彦. 非平衡下の経済法則. 数理科学(日), 1986. (7)

伊久莫夫 阿. 对经济长波论的批评性分析. 世界经济译丛, 1988(9)

7.6 系统进化的因素与判据

同 7.3

附录 现代系统理论研究概况

引言

Klir G J (ed). *Trends in General Systems Theory*. New York: Wiley, 1972

Laszlo E (ed). *The Relevance of General Systems Theory*. New York: George Braziller, 1972

Lilienfeld R. *The Rise of Systems Theory*. New York: John Wiley & Sons, 1978

1. 以生物学和/或心理学为背景的系统理论

Bertalanffy L v. *General System Theory*. New York: George Braziller, 1968

Miller J G. *Living Systems*. New York: McGraw - Hill, 1978; Miller J G., Miller J L. Introduction: the nature of living systems. *Behavioral Science*, 1990. 35(3): 157—163; Miller J G. The timer. *Behavioral Science*, 1990. 35(3): 164—196

Eigen M, Schuster P. *The Hypercycle*. Berlin: Springer -

Verlag, 1979

朴昌根. 生命系统理论. 上海: 全国第一届系统学研讨会, 1990;
上海机械学院学报, 1991, 第 13 卷增 1 期

朴昌根. 系统·信息·控制(第二篇第二章生命系统). 见: 李继宗等. 系统·信息·控制. 上海: 华东师范大学出版社, 1990

2. 以物理学为背景的系统理论

湛垦华, 沈小峰等. 普利高津与耗散结构理论. 西安: 陕西科技出版社, 1982

Haken H. *Synergetics*. Berlin: Springer - Verlag, 1983

Haken H. *Advanced Synergetics*. Berlin: Springer - Verlag, 1983

哈肯 H. 信息与自组织. 成都: 四川教育出版社, 1988

槌田敦. 资源物理学入门. 东京: 日本放送出版协会, 1982; 朴昌根译. 资源物理学. 上海: 华东化工学院出版社, 1991

槌田敦. エントロピーとエコロジー. 東京: ダイアモンド社, 1987

3. 以数学为背景的系统理论

Mesarovic M D. *Views on General Systems Theory*. New York: John Wiley, 1964

Wymore A W. *A Mathematical Theory of Systems Engineering*. New York: John Wiley, 1967

Klir G J. *An Approach to General Systems Theory*. Princeton (N. J.): Nostrand, 1968

Arnold V I. *Catastrophe Theory*. Berlin: Springer - Verlag, 1986

桑德斯 P T. 灾变理论入门. 上海:上海科技出版社,1983

Mandelbrot B B. *Fractals*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1977

高安秀村. 分数维.. 北京:地震出版社,1989

李后强等. 分形与分数维. 成都:四川教育出版社,1990

4. 以控制论和/或信息论为背景的系统理论

维纳 N. 控制论. 北京:科学出版社,1963

欣内尔斯 S M. 现代控制系统理论及应用. 北京:机械工业出版社,1979

马可 H. 系统理论方法. 北京:人民教育出版社,1981

Faure P, Depeyrot M. *Elements of System Theory*. New York: North - Holland, 1977

Kalman R E. *Lecture on Systems Theory*. Beijing: Chinese Academy of Science, 1981

Флейшман Б С. *Основы Системологии*. М: Радио и Связь, 1982

Forrester J W. *Industrial Dynamics*. Cambridge: M. I. T. Press, 1961; *Principles of Systems*. Cambridge: Wright - Allen Press, 1968; *Urban Dynamics*. Cambridge: M. I. T. Press, 1969; *World Dynamics*. Cambridge: Wright - Allen Press, 1971

Sandell. N R, et al. *IEEE Trans. On Automatic Control*, AC-23, 1978(2)

浅居喜代治等. あいまいシステム理論入門. 東京:オーム社,1978

邓聚龙. 灰色控制理论. 武汉:华中工学院出版社,1985

邓聚龙. 灰色系统(社会·经济). 北京:国防工业出版社,1985

5. 以社会科学为背景的系统理论

李德等. 运筹学. 北京:清华大学出版社,1982

里昂惕夫 沃. 投入产出经济学. 北京:商务印书馆,1980

兰格 O. 经济控制论导论. 北京:中国社会科学出版社,1981

Georgescu - Roegen N. *The Entropy Law and the Economic Process*, Cambridge(Mass.); Harvard University Press, 1971

Daly H U. The economic thought of Frederick Soddy. In: *History of Political Economy*. Durham (N. C.); Duke Univ. Press, 1980, 12:4

Buckley W. *Sociology and Modern Systems Theory*. Englewood Cliffs(N. J.); Prentice - Hall, 1967

Gharajedaghi J. Social dynamics (dichotomy or dialectic). In: *General Systems*, Yearbook of the Society for General Systems Research, 1982(Vol. 27)

公文俊平. 社会システム論. 東京:日本経済新聞社,1978

公文俊平. ネットワーク社会,東京:中央公論社,1988

(韩国经济开发曾被视为运用系统方法实现经济高速增长的典型案例,见:联合国国际关系委员会国际科学技术发展局编. 系统分析和运筹学——发展中国家制订政策和计划的工具. 北京:中国社会科学出版社,1979)

朴昌根. 韩国经济腾飞的动因及其发展趋势. 亚太论坛,1994 (5)

朴昌根. 韩宝钢铁公司:从崛起到破产. 宝钢经济与管理,1997. (1)

朴昌根. 韩国产业政策. 上海:上海人民出版社,1998

朴昌根等. 论韩国总统金大中的经济哲学. 国际观察,1999. (3)

朴昌根. 东北亚经济圈、朝韩合作与朝鲜的改革开放. 见: 朴昌根. 全球化与韩国的应对. 汉城: 白山资料院, 2003

朴昌根. 经济危机以后韩国的企业结构调整. 世界经济文汇, 2003, 增刊第 1 辑

朴昌根. 东北亚新秩序中的韩半岛经济(韩文). 见: 国际韩民族财团. 分裂的韩半岛、统一的德国: 21 世纪韩半岛与欧盟的合作与发展. 柏林: 第四次世界韩民族论坛论文集, 2003

6. 以哲学为背景的系统理论

Laszlo E. *Introduction to Systems Philosophy*. New York: Gordon and Breach, 1972

拉兹洛 E. 用系统论的观点看世界. 北京: 中国社会科学出版社, 1985

Bunge M. A Systems concept of society: Beyond individualism and holism. In: *General Systems*, Yearbook of the Society for General Systems Research, 1979. Vol. 24

克劳斯 G. 从哲学看控制论. 北京: 中国社会科学出版社, 1981

乌约莫夫 A И. 系统方式和一般系统论. 长春: 吉林人民出版社, 1983

库兹明 B И. 马克思理论和方法论中的系统性原则. 北京: 生活·读书·新知三联书店, 1980

岩崎允胤. 科学的認識と弁證法. 東京: 梓出版社, 1979